

**ОБ УСТОЙЧИВОСТИ БОКОВЫХ ПОРОД ПРИ ДЕЙСТВИИ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК****И. В. Иорданов, Ю. И. Симонова, А. В. Положий, С. В. Подкопаев**Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет»  
пл. Шибанкова, 2, г. Покровск, Донецкая обл., 85300, Украина. E-mail: yuliia.simonova@donntu.edu.ua**В. Ю. Довгаль**ГП «Национальная угольная компания», Минтопэнерго Украины  
ул. Хрещатик, 30, г. Киев, 02000, Украина.**Г. Э. Бойченко**

ООО «Шахта «Свято-Покровская №3»

пл. Шибанкова д. 1-А, г. Покровск, Донецкая обл., 83000, Украина.

Исследовано влияние изгибных деформаций, проявляющихся при динамических нагрузках, на устойчивость кровли угольного пласта позади очистного забоя. Для решения этой задачи, породы кровли рассматриваются в виде балки, имеющей различные варианты опорных связей, а в число сил, действующих на балку в произвольный момент времени, входят динамическая нагрузка, вес массы, сила сопротивления колебаниям и реакция системы. В результате выполненных исследований установлено, что напряженно-деформированное состояние рассматриваемой системы обуславливается ее кинематической характеристикой, т.е. зависит от количества степеней свободы – параметров, определяющих положение деформируемой системы в плоскости. При наличии в рассматриваемой деформируемой системе податливых связей, при определении перемещений балки от изгиба, необходимо учитывать податливость опор. Реакция податливой системы на внешнее возмущение, представляет собой процесс, который поддается регулировке, за счет изменения жесткости опор. В реальных условиях разработки угольных пластов, при действии динамических нагрузок на боковые породы, для обеспечения их устойчивости позади очистного забоя, целесообразно применение податливых опор или закладки выработанного пространства при ведении очистных работ, с учетом обоснованного гранулометрического состава разрыхленных горных пород в закладочном массиве.

**Ключевые слова:** горное давление, обрушения, изгибные колебания, динамические нагрузки, податливая опора, закладка выработанного пространства.

**ПРО СТІЙКОСТЬ БІЧНИХ ПОРІД ПРИ ДІЇ ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ****І. В. Іорданов, Ю. І. Сімонова, А. В. Положий, С. В. Подкопаєв**Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет»  
пл. Шибанкова, 2, м. Покровськ, Донецька обл., 85300, Україна. E-mail: yuliia.simonova@donntu.edu.ua**В. Ю. Довгаль**ДП «Національна вугільна компанія», Мінпаливенерго України  
вул. Хрещатик, 30, м. Київ, 02000, Україна.**Г. Е. Бойченко**

ТОВ «Шахта» Свято-Покровська №3 »

пл. Шибанкова, буд. 1-А, м. Покровськ, Донецька обл. 83000, Україна.

Досліджено вплив вигинистих деформацій, що виявляються при дії динамічних навантажень, на стійкість покрівлі вугільного пласта позаду очисного вибою. Для вирішення цього завдання, породи покрівлі розглядаються у вигляді балки, що має різні варіанти опорних зв'язків, а в число сил, що діють на балку в довільний момент часу, входять динамічне навантаження, вага маси, сила опору коливань і реакція системи. В результаті виконаних досліджень встановлено, що напружено деформований стан розглянутої системи обумовлюється її кінематичною характеристикою, тобто залежить від кількості ступенів свободи - параметрів, що визначають положення деформованої системи в площині. Для забезпечення цілісності порід покрівлі при дії динамічних навантажень, коли покрівля вважається балкою і має жорсткі опорні зв'язки, необхідно, щоб дотримувалась пропорційність між діючими силами і деформаціями. Коли така умова не виконується, руйнування покрівлі походить від згинальних деформацій. Стійкість порід покрівлі забезпечується в тому випадку, якщо деформована система під дією динамічних навантажень, знаходиться в стані рівноваги. Всі переміщення системи, поблизу такого стану, забезпечуються наявністю піддатливих опор. При наявності в даній деформованій системі піддатливих зв'язків, при визначенні переміщень балки від вигину, необхідно враховувати піддатливість опор. Реакція податливої системи на зовнішнє обурення, являє собою процес, який піддається регулюванню, за рахунок зміни жорсткості опор. В реальних умовах розробки вугільних пластів, при дії динамічних навантажень на бічні породи, для забезпечення їх стійкості позаду очисного вибою, доцільно застосування піддатливих опор або закладки виробленого простору при веденні очисних робіт, з урахуванням обгрунтованого гранулометричного складу розпушених гірських порід, що забезпечить підтримку бічних порід позаду очисного вибою і дозволить створити безпечні умови праці гірників в глибоких вугільних шахтах.

**Ключові слова:** гірничий тиск, обвалення, згинні коливання, динамічні навантаження, податлива опора, закладка виробленого простору.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Опыт работы шахт Донбасса показывает, что с ростом глубины горных

работ в углепородном массиве вмещающем выработку, начинает проявляться такой негативный фак-

тор, как расслоение боковых пород, оказывающий существенное влияние на состояние боковых пород. В реальных условиях разработки угольных пластов, при отсутствии для расслоившихся пород кровли эффективного подпора позади очистного забоя, опасность возникновения аварийных ситуаций от обвалов и обрушений возрастает. Подработанные и расслоившиеся породы вышележащей толщи, оседающие на хаотически обрушенные слои непосредственной кровли, представляют собой блочный массив, состоящий из балок различной длины, которые одновременно изгибаются и неконтролируемо обрушаются позади очистного забоя, создавая неблагоприятную геомеханическую обстановку в окрестности поддерживаемых горных выработок.

Детальный анализ аварий, произошедших в период с 2000 по 2018 г.г. на угольных шахтах Украины, позволяет сделать вывод о том, что основной причиной травматизма от обвалов и обрушений пород в углепородном массиве вмещающем выработки, является недостаточная изученность природы обрушений, в связи с этим, принятие ошибочных технических решений при выборе способа управления кровлей в очистном забое и охраны участков подготовительных выработок.

Изучение особенностей проявления горного давления в выработках на большой глубине [1, 2], 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 так же способность деформироваться и разрушаться при разгрузке. Как показало изучение процесса сдвижений и деформаций расслоившейся углепородной толщи, зона расслоения боковых пород составляет по нормали к напластованию в кровлю и почву разрабатываемого пласта 4-8 м [2]. На динамику и параметры образования таких зон, в значительной степени влияет способ управления кровлей в лаве. Негативные последствия такой геомеханической ситуации могут проявляться в том, что расслоившиеся породы внезапно обрушаются по всей длине очистного забоя и способствуют проявлению динамических нагрузок, в результате чего происходят завалы горных выработок и травмирование горнорабочих.

Характерной особенностью динамических нагрузок является то, что в результате их воздействия на породы кровли, в последних могут возникать колебания [3, 4]. В динамических задачах, в частности, в задачах о колебаниях, положение точек деформируемой системы изменяется с течением времени и установленные координаты являются функциями времени [5, 6]. Основная задача динамического исследования состоит в нахождении этих функций, т.е. в определении закона движения рассматриваемой системы.

В любой колебательной системе есть важнейшая характеристика, это собственная частота колебаний. Для ее определения используют модальный анализ, который заключается в определении частот и мод колебаний рассматриваемой системы. В этом случае, мода представляет собой абстрактный матема-

тический параметр, который определяет деформацию рассматриваемой системы [7, 8].

Изучение динамики сооружений, имеет важное значение для оценки эксплуатационного состояния изучаемого объекта, а следовательно, правильное представление об устойчивости боковых пород при действии на них динамических нагрузок, позволит разработать мероприятия, направленные на повышение безопасности труда горнорабочих и снижение уровня травматизма при ведении горных работ в глубоких угольных шахтах. Практическая важность проблемы устойчивости боковых пород, обусловлена прежде всего тем, что в результате ее решения для обоснованного выбора способа охраны горных выработок в конкретных горно-геологических условиях разработки угольных пластов, необходимо оценить предельную или критическую деформацию пород кровли, в зависимости от физико-механических свойств боковых пород и действующей нагрузки.

Целью настоящих исследований является изучение влияния изгибных деформаций, проявляющихся при действии динамических нагрузок и, их влияние на устойчивость кровли угольного пласта позади очистного забоя.

Для достижения поставленной цели были выполнены исследования устойчивости пород кровли угольного пласта, которые рассматривали в виде балки, имеющей различные варианты опорных связей. Исследования были выполнены с использованием фундаментальных положений горной геомеханики, теории упругости и колебаний, динамики сооружений.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** В реальных условиях разработки угольных пластов, при различных способах управления кровлей в лаве и охраны штреков, когда породы кровли считаются балкой, сохранность горных выработок обеспечивается устойчивостью непосредственной кровли пласта, как основного несущего элемента подземного сооружения. При ведении очистных работ, в при забойном пространстве лавы происходит последовательное отделение слоев от вышележащей толщи и их прогиб по нормали к напластованию, подобно балке имеющей опоры [9]. Согласно гипотезе балок [2], можно предположить, что в очистном забое непосредственная и основная кровля, представленная твердыми слоистыми породами, деформируются и разрушаются подобно балкам, с всевозможными вариантами опорных связей. Устойчивость породного обнажения существенно зависит от степени предварительной трещиноватости пород кровли, сформировавшейся впереди очистного забоя, а так же величины их прогиба, когда отдельные блоки расслоившейся породной толщи работают как шарниры.

Для надежной работы деформируемой системы, в которой кровля пласта считается балкой с различными вариантами опорных связей, т.е. обеспечения ее целостности позади очистного забоя, необходимо, чтобы все элементы этой системы были устойчивыми. Это достигается определенными условиями деформирования балки, когда соблюдается пропорциональность между действующей силой и прояв-

ляючимися деформаціями. В тих случаях, когда такие условия не выполняются, разрушение балок будет происходить от критической нагрузки при расчете балки на изгиб [4, 10].

Рассмотрим деформируемую систему в виде балки, длина которой  $L$ , (м), толщина  $h$ , (м), ширина  $b$ , (м), модуль упругости  $E$ , (МПа). Считаем, что при обрушении расслоившейся породной толщине на балку с неподвижными шарнирными опорами А и В, падает породный блок массой  $m$ , (кг) (рис. 1). Породный блок прямоугольной формы налетает со скоростью  $V$ , (м/с) и удерживается на балке при колебаниях (рис. 1, а). Рассматриваем неупругий удар. В начале удара перемещение балки равно  $x_0=0$ , а  $V=V_0=\sqrt{2gH}$ , где  $H$  – высота падения блока, (м). Параметры балки и массы таковы, что в расчетной схеме балка будет безмассовой. Такая система при поперечных к оси балки колебаниях массы, будет системой с одной степенью свободы.

Известно [11], что полное перемещение балки  $x$ , (м) в точке приложения груза состоит из слагаемых, которые учитывают статику и динамику загрузки балки. Для балки, имеющей на своих концах неподвижные шарнирные опоры (рис. 1), имеем

$$x(t) = \delta_{ст} + a \sin(\omega t + \varphi_0), \quad (1)$$

где  $\delta_{ст}$  – статический прогиб балки в месте приложения груза, м;  $a$  – амплитуда колебаний, м;  $\varphi_0$  – начальная фаза колебаний.

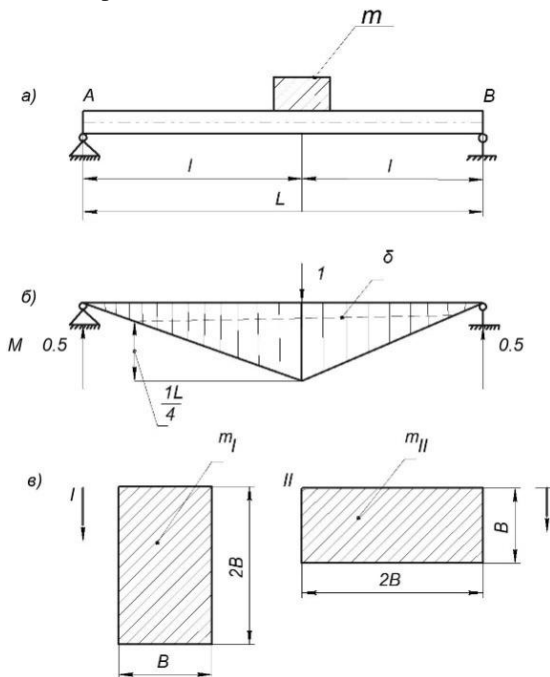


Рисунок 1 – Расчетная схема балки - непосредственной кровли угольного пласта с неподвижными шарнирными опорами: а) общая схема; б) эпюра изгибающих моментов  $M$ , (Н·м). в) варианты падения породного блока на балку: I –  $b=B$ , (м);  $h=2B$ , (м); II –  $b=2B$ ;  $h=B$ , (м),  $m_I, m_{II}$ ,  $L$  – длина балки, (м),  $\delta$  – прогиб балки, (м)

Амплитуда свободных колебаний  $A$ , (м) такой системы определяется по выражению

$$a = \sqrt{x_0^2 + \frac{V_0^2}{\omega^2}}, \quad (2)$$

где  $\omega$  – круговая частота собственных колебаний, 1/с.

В состоянии равновесия, масса  $m$ , (кг) действует на балку статической силой веса  $P=mg$ , (Н) и вызывает статический прогиб и соответствующие статические усилия и деформации. Эпюра изгибающих моментов балки представлена на рис. 1, б.

При учете только изгибных деформаций, с использованием формулы Симпсона [12–15], получим выражение для определения прогиба такой балки, который равен

$$\delta = \int_0^L \frac{M^2}{EI} dx = \frac{L^3}{48EI}. \quad (3)$$

Известно [12], что собственная круговая частота  $\omega$ , (1/с) системы с одной степенью свободы определяется по выражению  $\omega = \sqrt{\frac{1}{\delta}}$ , с учетом величины прогиба  $\delta$ , (м). Тогда для рассматриваемой деформируемой системы, круговая частота свободных колебаний  $\omega$ , (1/с) и количество колебаний  $\nu$ , (1/с) в единицу времени определяется как

$$\omega = \sqrt{\frac{48EI}{mL^3}} \quad (4)$$

и

$$\nu = \frac{\omega}{2\pi}. \quad (5)$$

Период колебаний  $T$ , (с) определяется как в [5, 13–15] по выражению

$$T = \frac{2\pi}{\nu}. \quad (6)$$

Согласно [13], в рассматриваемой деформируемой системе уравнение движения массы имеет вид

$$x(t) = \frac{V}{\omega}, \quad (7)$$

а действующая сила равна

$$P = -m\ddot{x}(t) = m\omega^2 x(t) = V \sqrt{48EI \frac{m}{L^3}} \sin \omega t. \quad (8)$$

Расчетный изгибающий момент  $M$ , (Н·м) в такой деформируемой системе, установленный с учетом рекомендаций [16], будет максимальным в середине пролета, и соответствует

$$M \left( \frac{L}{2} \right) = \frac{Pl}{4} = V \sqrt{3EI \frac{m}{L}}. \quad (9)$$

В расчетах напряжений при динамических нагрузках, в некоторых случаях учитывается форма падающего тела, которое после соприкосновения с ударяемым телом, влияет на возникающие в нем напряжения. Динамические напряжения, в этом случае, согласно [10, 12], можно определить как

$$\sigma_{дин} = k_{дин} \cdot \sigma_{ст}, \quad (10)$$

где  $k_{дин}$  – динамический коэффициент.

В [16] при  $H \gg \delta_{ст}$ , значения динамического коэффициента можно определить по выражению

$$k_{дин} = \sqrt{\frac{2H}{\delta_{ст}}}. \quad (11)$$

Напряжения в рассматриваемой системе, при статическом нагружении определяются как в [16, 17–20]

$$\sigma_{ст} = \frac{PL}{4W}, \quad (12)$$

где  $W$  – момент сопротивления плоского сечения,  $m^3$ .

Рассмотрим случай I, когда  $b=B$ , (м) и  $h=2B$ , (м) (рис. 1, в) и определим момент сопротивления плоского сечения

$$W_I = \frac{bh^2}{6} = \frac{2b^3}{3}, \quad (13)$$

и, случай II, при котором  $b=2B$ , (м) и  $h=B$ , (м) (рис. 1, в)

$$W_{II} = \frac{b^3}{3}. \quad (14)$$

При этом, необходимо учитывать, что момент инерции плоского сечения I, ( $m^4$ ) в случае I равен

$$I_I = \frac{bh^3}{12} = \frac{2b^4}{3}, \quad (15)$$

и в случае II

$$I_{II} = \frac{b^4}{6}. \quad (16)$$

Отношение динамических напряжений для случаев I и II, когда  $m_I=m_{II}$ , (кг) (рис. 1, в) имеет вид

$$Z = \sqrt{\frac{I_I}{I_{II}} \cdot \frac{W_{II}}{W_I}} = 1, \quad (17)$$

что свидетельствует о том, что при падении породного блока массой  $m$ , (кг) с высоты  $H \gg \delta_{ст}$ , (м) динамические напряжения  $\sigma_{дин}$ , (МПа) одинаковые. Очевидно то, что при падении на балку породного блока прямоугольной формы основанием или малым сечением, при расчетах динамических напряжений, следует учитывать только массу падающего груза.

Теперь изменим характер опорных связей балки в точках A и B, на жесткие заземляющие опоры (рис. 2). Общая схема такой балки представлена на рис. 2, а.

Построим эпюру изгибающих моментов  $M$ , (Н·м) известным способом, изложенным в [10, 16].

На рис. 2 в, г показаны эпюры от действия единичных сил  $M_p=1$  (Н·м) и  $\bar{M}$ , (Н·м), которые используются для определения податливости такой балки, имеющей длину  $L$ , (м).

Податливость балки с заземленными опорами определим с помощью интеграла Максвелла - Мора [10, 16]. С использованием формулы Симпсона [12, 16], получим выражение прогиба балки

$$\delta = \int_0^L \frac{M_{p=1} \bar{M}}{EI} dx = \frac{L^3}{192EI}. \quad (18)$$

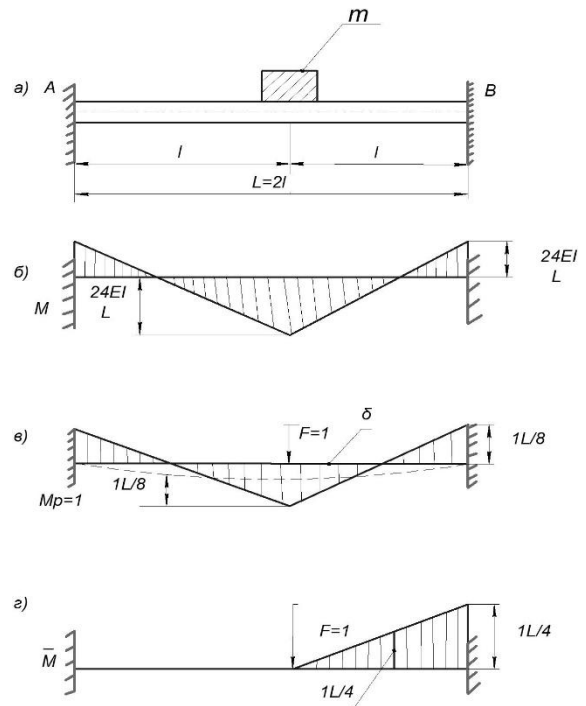


Рисунок 2 – Схема балки - непосредственной кровли угольного пласта с жесткими заземляющими опорами: а) общая схема; б) эпюра изгибающих моментов  $M$ , (Н·м), в), г) эпюры изгибающих моментов от действия единичных сил  $M_p=1$ ;  $\bar{M}$ , (Н·м):  $L$  – длина балки, (м);  $\delta$  – прогиб балки, (м)

А с учетом (18), выражение для определения собственной круговой частоты рассматриваемой деформируемой системы принимает вид

$$\omega = \sqrt{\frac{192EI}{L^3}}. \quad (19)$$

Количество колебаний  $\nu$ , (1/с) в единицу времени и период таких колебаний  $T$ , (с) определяется, соответственно по выражениям (5) и (6).

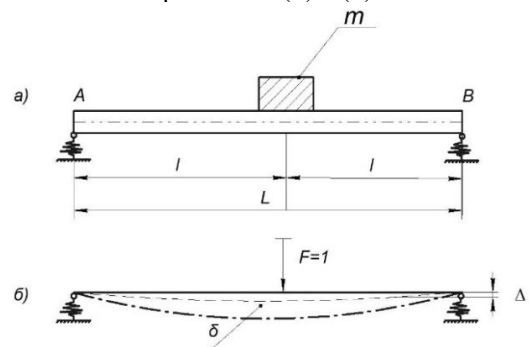


Рисунок 3 – Расчетная схема балки - непосредственной кровли угольного пласта с податливыми опорами: а) общая схема; б) с учетом действия единичной силы  $F=1$

На рис. 4 а, б представлены графики изменения круговой частоты  $\omega$ , (1/с), периода  $T$ , (с) и количества колебаний  $\nu$ , (1/с) в единицу времени деформируемой системы, с учетом длины балки  $L$ , (м), когда балка имеет различные варианты опирания

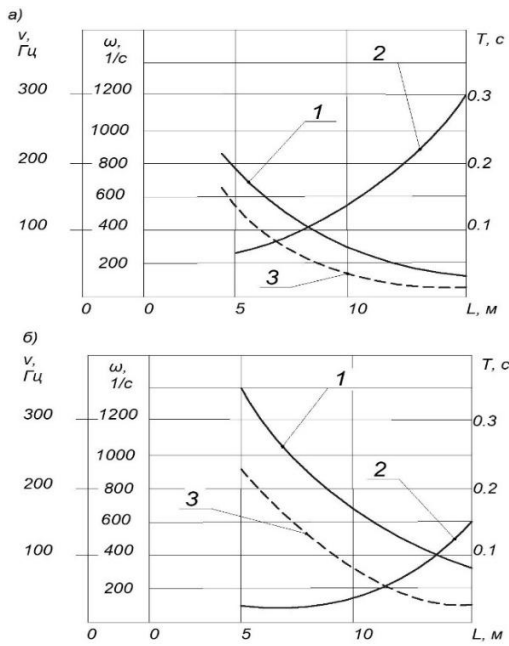


Рисунок 4 – Графики изменения круговой частоты  $\omega$ , (1/с), периода  $T$ , (с) и количества колебаний  $\nu$ , (1/с) в единицу времени рассматриваемой деформируемой системы от длины балки  $L$ , (м): а) с неподвижными шарнирными опорами; б) с жестким защемлением концов балки; 1- $\omega$ , (1/с); 2-  $T$ , (с); 3-  $\nu$ ,(1/с);  $E=12000$  МПа,  $b=1,0$  м,  $h=0,5$  м,  $m=100$  кг

Из представленных зависимостей видно, что с увеличением длины балки с  $L=5$  м до  $L= 15$  м, т.е. в три раза, круговая частота колебаний рассматриваемой деформируемой системы, при наличии неподвижных шарнирных опор, уменьшается с  $\omega=702$  1/с до  $\omega=1451$ /с, т.е. приблизительно в 5 раз (рис. 4, а). При наличии, жесткого защемления балки, этот параметр уменьшается с  $\omega=1390$  1/с до  $\omega=280$  1/с, т.е. так же в 5 раз (рис. 4, б).

Такие же количественные изменения параметров колебательной системы, отмечены при определении периода  $T$ , (с) и количества колебаний  $\nu$ , (1/с) в единицу времени (рис. 4 а, б). При сравнении величины круговой частоты колебаний  $\omega$ , (1/с) рассматриваемой системы, при ее различных опорных связях, когда сравнивали установленные параметры для балки с неподвижными шарнирными опорами и жестким защемлением, различие составило около 50% (рис. 4 а, б).

На следующем этапе исследований, жесткие вертикальные опорные связи заменим на податливые, с учетом величины их податливости  $\Delta$ , (м). В нашем случае, это будет балка на податливых опорах (рис. 3). В том случае, если рассматриваемая деформируемая система содержит податливые связи, то при определении перемещений, помимо деформаций изгиба, необходимо учитывать податливость опор, что уменьшает ее жесткость.

Податливость балки в такой системе, будет определяться по выражению

$$\delta = \delta_{ст} + \delta_{оп} . \quad (20)$$

Величина  $\delta_{ст}$ , (м) представляет собой статический прогиб балки, связанный с ее изгибом.

Величина  $\delta_{оп}$ , (м), является перемещением балки от действия единичной силы, связанной с осадкой опор от действующих сжимающих сил со значением

$$\delta_{оп} = 0.5\Delta. \quad (21)$$

В результате этого, круговая частота определяется по выражению

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{m(0.5\Delta + \frac{L^3}{48EI})}} . \quad (22)$$

Значения  $\nu$ , (1/с) и  $T$ , (с) определяются в соответствии с (5) и (6).

В выражении (22) при  $\Delta=0$ , когда имеем абсолютно жесткие опоры, круговая частота колебаний  $\omega$ , (1/с), будет уменьшаться при увеличении длины  $L$ , (м) балки, т.е. за счет уменьшения ее изгибной жесткости. В случае, когда величина  $\Delta$ , (м), увеличивается, тем меньше становится значение  $\omega$ , (1/с). Очевидно, при неограниченном перемещении балки, постоянной изгибной жесткости когда  $\Delta \rightarrow \infty$ , круговая частота собственных колебаний будет стремиться  $\omega \rightarrow 0$ , что свидетельствует об отсутствии колебаний в деформируемой системе.

Динамические задачи не дают единственного решения для установления закона движения деформируемых систем и поэтому, приходится изучать все возможные состояния изучаемой модели.

Рассмотрим теперь деформируемую систему с податливыми опорами, которая имеет две степени свободы. На рис. 5 представлена расчетная схема такой абсолютно жесткой балки, лежащей на податливых опорах, жесткость которых  $C$  (Н/м). На балке размещен груз массой  $m$ , (кг). В качестве независимых переменных- обобщенных координат, считаем вертикальные перемещения центра тяжести груза  $p$  и угол поворота груза  $\varphi$  (рис. 5, а).

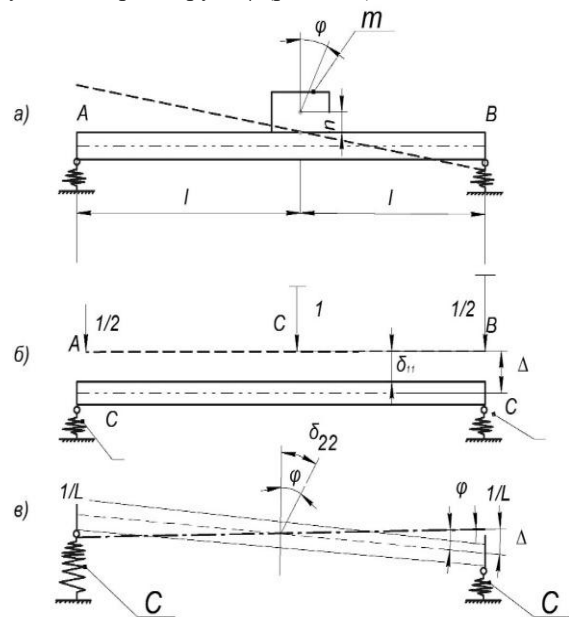


Рисунок 5 – Расчетная схема к определению собственных колебаний груза- породного блока массой  $m$ , (кг), обрушившегося на балку длиной  $L$ , (м): а) общая схема, б), в) положение системы при единичном нагружении;  $C$  – жесткость опоры, Н/м

В случае действия произвольной нестационарной силы, для точного определения перемещений, теоретически требуется учет всех форм собственных колебаний.

Известно [13, 14, 20], что свободные колебания системы с двумя степенями свободы, происходят с двумя частотами- модами. Движение такой деформируемой системы, может быть представлено как суперпозиция двух нормальных колебаний соответственно, с частотами  $\omega_1, (1/c)$  и  $\omega_2, (1/c)$ .

Для определения собственных частот воспользуемся частотным уравнением общего вида как в [7, 10, 12], заменив в нем массу  $m$ , (кг) на момент инерции массы груза  $I$ , ( $\text{кг}/\text{м}^2$ ) относительно центральной оси, перпендикулярной плоскости. Выразим единичные перемещения, входящие в частотное уравнение, через исходные данные. После условного нагружения системы единичной силой  $F=1$ , (Н) (рис. 5, б) получим

$$\delta_{11} = \Delta = \frac{1}{c}. \quad (23)$$

При этом, угол поворота груза будет равен  $\varphi=0$ , а, следовательно,  $\delta_{21} = 0$ .

После нагружения системы единичным моментом (рис. 5), получаем

$$\delta_{22} = \frac{2\Delta}{l} = \frac{2}{cl^2}. \quad (24)$$

В этом случае, центр тяжести груза не перемещается, и тогда

$$\delta_{12} = \delta_{21}. \quad (25)$$

С учетом полученных зависимостей (23) и (24) и после соответствующих преобразований, частотное уравнение представленное в обобщенной форме в [7, 12], принимает вид

$$(1 - \omega^2 M \delta_{11})(1 - \omega^2 I \delta_{22}) = 0,$$

из которого получаем выражения, для определения частот  $\omega_1, (1/c)$  и  $\omega_2 (1/c)$ , т.е.

$$\omega_1 = 1.4 \sqrt{\frac{c}{m}} \text{ и } \omega_2 = 2.2 \sqrt{\frac{c}{m}}. \quad (26)$$

На рис. 6 представлены графики изменения круговой частоты собственных колебаний  $\omega_1, (1/c)$  и  $\omega_2 (1/c)$  деформируемой системы с учетом изменения жесткости податливых опор  $C$ , (Н/м).

Из приведенных зависимостей видно, что круговая частота  $\omega$ , (1/с) для первой и второй моды увеличивается, по мере увеличения жесткости податливой опоры (рис. 6). Увеличение жесткости опоры в два раза, с  $C=2000$  Н/м до  $C=4000$  Н/м, приводит к росту круговой частоты  $\omega$ , (1/с) соответственно, для моды 1 с  $\omega_1=6.5$  1/с до  $\omega_2=10.2$  1/с, для моды 2, с  $\omega_1=10,2$  1/с до  $\omega_2=14,3$  1/с (рис. 6). Следует отметить, что это увеличение незначительно, в сравнении с колебаниями системы, имеющей шарнирно-неподвижные или жесткие опоры. Однако, наличие мод, которые имеют свою характерную частоту,

определяет вид движения рассматриваемой системы. Чем больше степеней свободы рассматриваемой системы, тем сложнее вид движения изучаемого объекта [11, 15].

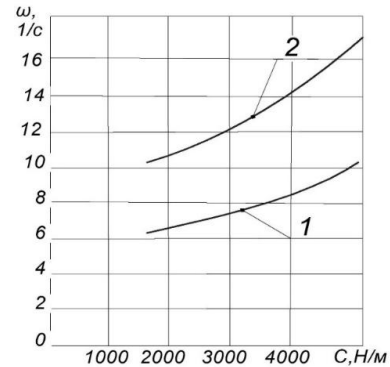


Рисунок 6 – Графики изменения круговой частоты собственных колебаний  $\omega_1, (1/c)$  и  $\omega_2 (1/c)$  деформируемой системы с учетом изменения жесткости податливых опор  $C$ , (Н/м): 1- $\omega_1, (1/c)$ ; 2-  $\omega_2 (1/c)$ ;  $E=12000$  МПа,  $b=1,0$  м,  $h=0,5$  м,  $m=100$  кг

В результате выполненных исследований установлено, что в рассматриваемой системе, изменение ее жесткости зависит не только от изменения изгибной жесткости балки  $EI$ , ( $\text{Н}\cdot\text{м}^2$ ), а в реальных условиях, модуля упругости пород непосредственной кровли, но и от опорных связей балки, которые определяют частоту колебаний. Собственная частота колебаний, является важной характеристикой деформируемой системы, которая не зависит от амплитуды колебаний, а обуславливается ее массой и жесткостью. Наличие податливого основания, определенной жесткости, обеспечивает перемещение системы, вблизи устойчивого положения равновесия. Реакция деформируемой системы с податливыми опорами на внешнее возмущение, представляет собой процесс, который поддается регулировке, за счет изменения жесткости податливых опор.

Таким образом, при изучении изгибных деформаций боковых пород при действии на них динамических нагрузок, задача о перемещениях и напряжениях, возникающих в рассматриваемой системе, может быть решена методами теории упругости и колебаний, когда установлен закон движения моделируемой системы и определены моменты времени, при которых характеристики напряженно- деформированного состояния достигают максимальных значений. Устойчивость пород кровли угольного пласта, обеспечивается в том случае, если деформируемая система, под действием динамических нагрузок, находится в состоянии устойчивого равновесия. Все перемещения, вблизи такого состояния, обеспечиваются наличием податливых опор, имеющих определенную жесткость. В реальных условиях разработки угольных пластов, это могут быть податливые опоры из породы или закладка выработанного пространства при ведении очистных работ, с учетом обоснованного гранулометрического состава разрыхленной горной породы в податливой опоре или закладочном массиве.

**ВЫВОДЫ.** Для обеспечения целостности пород кровли при действии динамических нагрузок, когда кровля считается балкой и имеет жесткие опорные связи, необходимо, чтобы соблюдались пропорциональность между действующими силами и деформациями. Когда такое условие не выполняется, разрушение кровли происходит от изгибных деформаций. При наличии податливых опорных связей, смещение балки зависит от деформаций изгиба и податливости опоры. Причем при увеличении податливости, когда изгибная жесткость балки не изменяется, круговая частота колебаний в деформируемой системе уменьшается. В реальных условиях разработки угольных пластов, для нейтрализации вредных проявлений горного давления, в частности, снижения величины ударной силы при внезапных обрушениях расслоившейся толщи, целесообразно применение податливых опор или закладки выработанного пространства при ведении очистных работ, что обеспечивает поддержание боковых пород позади очистного забоя и позволяет создать безопасные условия труда горнорабочих в глубоких угольных шахтах.

#### ЛИТЕРАТУРА.

1. Николин В. И., Подкопаев С. В., Агафонов А. В. Снижение травматизма от проявлений горного давления. Донецк: Норд-Пресс, 2005. 232 с.
2. Викторов С. Д., Иофис М. Д., Гончаров С. А. Сдвигение и разрушение горных пород. М: Наука, 2005. 277 с.
3. Discrete Oscillation Theory. Agarwal R. P., Bohner M., Grace S. R., O'Regan P. Hindwai Publishing Corporation, 2005. 961 p. ISBN: 9775945194.
4. Подкопаев С. В., Иорданов И. В., Чепига Д. А. О напряженно-деформированном состоянии боковых пород при внезапном обрушении основной кровли. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. Вип. 1/2017 (102). С. 66–71.
5. Гусев А. Ф., Новоселова М. В. Прикладная теория колебаний. Тверской госуд. ун-т, 2017. 160 с. ISBN- 978-5-7995-0908-8.
6. Bottega, W. J. Engineering Vibrations. CRC Press, Taylor&Francis Group, 2006. 727 p. ISBN0849334209
7. Денисов Г. В., Лапкин В. В. О сплошном спектре колебаний балочных элементов конструкции при высокочастотных воздействиях. *Инженерно-строительный журнал*. 2012. № 1. С. 91–129. doi: 10.5862/МСЕ.27.10
8. Маляр В. В. Определение частот собственных колебаний асфальтобетонных балок, испытываемых на вибростенде ХНАДУ. *Вестник ХНАДУ*, Вып. 64, 2014. С. 130–133.
9. Шашенко А. Н., Пустовойтенко В. П., Сдвижкова Е. А. Геомеханика. К.: Новый друк, 2016. 528 с. ISBN 978-617-635-088-0
10. Шакирзянов Р. А., Шакирзянов Ф. Р. Динамика и устойчивость сооружений. Казань: Изд-во Казанс. гос. архит-стр. ун-та, 2005. 120 с.
11. Ильин М. М., Колесников К. С., Саратов Ю. С. Теория колебаний. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. 271 с.
12. Baruh H. Applied Dynamics. Taylor Francis Group. LLS., 2015. 872 p. ISBN: 148225073X
13. Advances in Vibration Analysis Reserch. In Tech. (Ed.) F. Ebrahimi. 2011. 456p. ISBN 9789533072098
14. Kleppner D., Kolenkow R. An introduction to Mechanics. Cambridge University Press, 2014. 542 p. ISBN: 978-0-521-19811-2.
15. Ginsberg I. Engineering Dynamics. Cambridge University Press. 2008. 726 p. ISBN: 0521883032
16. Тимошенко С. П., Гере Дж. Механика материалов. СПб.: Изд-во «Лань», 2002. 672 с. ISBN: 5-9511-0003-8.
17. Циглер Ф. Механика твердых тел и жидкостей. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика» 2002. 912 с.
18. Kelly S. G. Advanced Vibration Analysis. CRCPress, Taylor@Francis Group. 2007. 650 p. ISBN: 978-1-4200-1532-4.
19. Pipparad A. B. The Physics of Vibration Cambridge University Press, 2007. 656 p.- ISBN:0521033330
20. Стрелков С. П. Введение в теорию колебаний. СПб.: Изд-во «Лань», 2005. 440с. ISBN5-8114-0614-2

#### ON SUSTAINABILITY OF SIDE SPECIES UNDER THE ACTION OF DYNAMIC LOADS

**I. Yordanov, Y. Simonova, A. Polozhiy, S. Podkopaev**

Public higher education institution «Donetsk National Technical University»

pl. Shibankova, 2, Pokrovsk, Donetsk region, 85300, Ukraine, E-mail: yuliia.simonova@donntu.edu.ua

**V. Dovgal**

SE "National Coal Company", Ministry of Fuel and Energy of Ukraine

vul. Khreschatyk, 30, Kiev, 02000, Ukraine.

**H. Boichenko**

LLC Mine Svyato-Pokrovskaya No. 3 Mine (Ukraine)

pl. Shibankova, 1-A, Pokrovsk, Donetsk region, 85300, Ukraine.

**Purpose.** The purpose of research is to study the bending deformations of lateral rocks, under the action of dynamic loads on them and their effect on the stability of the roof of the coal seam behind the clearing face. **Methodology.** To achieve this goal, studies of the stability of the rocks of the coal seam roof were performed, which were considered in the form of a beam having various variants of supporting links. The forces acting on a beam at an arbitrary point in time include the dynamic load, the weight of the mass, the resistance to vibration, and the response of the system. **Results.** As a result of the studies performed, it was established that the stress-strain state of the system under consideration is determined by its kinematic characteristic, i.e. depends on the number of degrees of freedom - the parameters that de-

termine the position of the deformable system in the plane. **Originality.** If in the deformable system in question there are pliable connections, when determining the displacement of a beam from bending, it is necessary to take into account the compliance of the supports. **Practical value.** The response of a malleable system to an external disturbance is a process that can be adjusted by changing the stiffness of the supports. In real conditions of coal seam development, under the action of dynamic loads on the lateral rocks, to ensure their stability behind the face, it is advisable to use malleable supports or laying out the worked out space when doing sewage works, taking into account the reasonable particle size of loose rocks in the filling mass. **Conclusions.** To ensure the integrity of the roof rocks under the action of dynamic loads, when the roof is considered to be a beam and has rigid support relationships, it is necessary to observe the proportionality between the forces acting and the deformations. When this condition is not met, the destruction of the roof occurs from bending deformations. In the presence of compliant support links, the displacement of the beam depends on the bending deformations and the compliance of the support. With increasing compliance, when the flexural rigidity of the beam does not change, the circular frequency of oscillations in the deformable system decreases. In real conditions of development of coal seams, to neutralize harmful manifestations of rock pressure, to reduce the magnitude of the impact force in case of sudden collapses of the stratified strata, it is advisable to use malleable supports or laying the worked out space. This ensures the maintenance of lateral rocks behind the stope and allows you to create safe working conditions for miners in deep coal mines.

**Key words:** rockpressure, crushing, bending vibrations, load response, foil bearing, goaf stowing.

#### REFERENCES

1. Nikolin, V. I., Podkopaev, S. V., Agafonov, A. V., Maleev, N. V. (2005), *Snizhenie travmatizma ot pro-yavlenij gornogo davlenija* [Injury Reduction of manifestations of rock pressure], Nord-Press, Donetsk, Ukraine.
2. Viktorov, S. D. (2005), *Sdvizhenie i razrushenie gornykh porod* [Displacement and destruction of rocks], Nauka, Moscow, Russia.
3. Agarwal, R. P., Bohrer, M., Grace, S. R., O'Regan, P. (2005), *Discrete Oscillation Theory*, Hind-wai Publishing Corporation, ISBN: 97775945194
4. Podkopaev, S. V., Iordanov, I. V., Chepiga, D. A. (2017), *O napryazhenno-deformirovannom sostoyanii bokovikh porod pri vnezapnom obrushenii osnovnoy krovli* [On the stress-deformed state of the lateral rocks during the sudden collapse of the main roof], Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National university, Vol. 1(102), pp. 66-71.
5. Gusev, A. F., Novoselova, M. V. (2017), *Priladnaya teoriya kolebaniy* [Applied theory of oscillations], Tver State Univ, ISBN- 978-5-7995-0908-8.
6. Bottega, W. J. (2006), *Engineering Vibrations*. CRC Press, Taylor&Francis Group, ISBN0849334209
7. Denisov, G., Lapkin, V. (2012), *O sploshnom spektre kolebaniy balochnykh elementov konstruksii pri vysokochastotnykh vozdeystviyakh* [On the continuous vibrational spectrum of beam elements of the structure], Engineering-building Journal, Vol. 1, pp. 91-129. doi: 10.5862/MCE.27.10
8. Malyar, V. (2014), *Opredeleniye chastot sobstvennykh kolebaniy asfal'tobetonnykh balok, ispytyvayemykh na vibrostende KHNADU* [Determination of natural vibration frequencies of asphalt concrete beams, tested on a HNADU vibrostand], Bulletin of KhNADU, Issue 64.
9. Shashenko, A. N., Pustovoitenko, V. P., Sdvizhikova, E. A. (2016), *Geomekhanika* [Geomechanics ], K. New druk, ISBN 978-617-635-088-0.
10. Shakirzyanov, R. A., Shakirzyanov, F. R. (2005), *Dinamika i ustoychivost' sooruzheniy* [Dynamics and stability of structures] Kazan: Publishing House Kazan State Architectural University.
11. Ilyin, M. M., Kolesnikov, K. S., Saratov, Yu. S. (2003), *Teoriya kolebaniy* [Theory of oscillations]/ M.M.Ilin, M, Izd-vo MGTU im.N.E.Baumana.
12. Baruh, H. (2015), *Applied Dynamics*, Taylor Francis Group, LLS. ISBN:148225073X.
13. Ebrahimi, F. (2011), *Advances in Vibration Analysis Reserch*, ISBN 9789533072098
14. Kleppner, D., Kolenkow, R. (2014), *An introduction to Mechanics*. Cambridge University Press, ISBN: 978-0-521-19811-2.
15. Ginsberg, I. (2008), *Engineering Dynamics*, Cambridge University Press. ISBN: 0521883032
16. Timoshenko, S. P. (1972), *Kurs teorii uprugosti* [Course of the theory of elasticity], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.
17. Tsigler, F. (2002), *Mehanika tverdyyh tel i zhidkostey* [Mechanics of solids and liquids], NITs «Regulyarnaya i haoticheskaya dinamika», Izhevsk, Russia.
18. Kelly, S. G. (2007), *Advanced Vibration Analysis*, CRC Press, Taylor&Francis Group. ISBN: 978-1-4200-1532-4.
19. Pippard, A. B. (2007), *The Physics of Vibration*, Cambridge University Press. ISBN:0521033330
20. Strelkov, S. P.(2005), *Vvedeniye v teoriyu kolebaniy* [Introduction to the theory of oscillations], Publishing house "Lan", ISBN5-8114-0614-2

Стаття надійшла 05.02.2019.