

## О ДИНАМИКЕ БОКОВЫХ ПОРОД ПРИ ИХ ВНЕЗАПНОМ ОБРУШЕНИИ

В. А. КОЛОМИЕЦ<sup>1</sup>, Д. А. ЧЕПИГА<sup>2\*</sup>, И. В. ИОРДАНОВ<sup>2</sup>, Н. Н. ВЛАСЕНКО<sup>2</sup>,  
С. С. АЛЕКСАНДРОВ<sup>2</sup><sup>1</sup>ШУ «Южнодонецкое №1», г. Угледар, УКРАИНА<sup>2</sup>ГВУЗ «ДонНТУ» МОН Украины, г. Покровск, УКРАИНА

\*daria.chepiha@donntu.edu.ua

**АННОТАЦИЯ** В результате проведенных аналитических исследований, с целью изучения динамики боковых пород при их внезапном обрушении, получены зависимости изменения частоты, периода колебаний и координат точек тела (балки – непосредственной кровли) в случае опирания на неподвижную шарнирную опору и на упругое основание. Сделан вывод, что при разработке пластов в сложных горно-геологических условиях на больших глубинах предпочтительней применять полную закладку выработанного пространства или широкие податливые полосы, что позволит снизить уровень травматизма горнорабочих.

**Ключевые слова:** травматизм; горное давление; колебания; динамика боковых пород; закладочный массив; податливая опора

## ABOUT DYNAMICS OF SIDE ROCK IN THEIR SUDDEN COLLAPSE

V. KOLOMIETS<sup>1</sup>, D. CHEPIGA<sup>2\*</sup>, I. IORDANOV<sup>2</sup>, N. VLASENKO, S. ALEKSANDROV<sup>2</sup><sup>1</sup>Mine management «Yuzhnodonbasskoe №1», Ugledar, UKRAINE<sup>2</sup>Public higher education institution Donetsk National Technical University, Pokrovsk, UKRAINE

**ABSTRACT** As a result of analyzes, with the aim of studying the dynamics of the wall rocks at their sudden collapse, prepared according to changes in the frequency, the oscillation period and the coordinate points of the body (the beam - just a roof) for bearing on a fixed pivot bearing and on an elastic foundation. The effects of fluctuations in the beam bending state of rocks mined seam roof with different methods of roof management - a complete collapse (deduction at the chock) and stowing. Fluctuations of this type are associated with the flexural deformation of beams, abbrev fluctuations in the load bearing beams. As the cargo considered heaped rock walls and supporting beams - just rock roof. Comprehensive research method was used with the use of theoretical mechanics, contact mechanics and the theory of elasticity. It is concluded that the development of reservoirs in difficult geological conditions at great depths is preferable to use a complete stowing or wide pliable strips. Tabbed array or pliable supports, which are based on breed and close the main roof as a result of their separation, eliminate negative phenomena manifested in the solid when a sudden collapse of the wall rocks or planting of the main roof. These solutions will improve the stability of development workings and as a consequence, reduce the level of injuries miners from landslides and collapses.

**Keywords:** rate of accidents; rock pressure; vibration; speaker wall rocks; filling mass; soft support

## Введение

Общеизвестно, что при добыче полезных ископаемых в подземных условиях приходится считаться с целым рядом факторов, приводящих к повышенной опасности для людей и объектов. Так, в реальных условиях разработки угольных пластов на современных глубинах, породы междупластья представляют собой чередующиеся слои угольных пластов и прослоев. Отличительная особенность такого массива заключается в том, что во всех случаях контакт между слоями представлен глинистыми разностями. В зонах разгрузки, глинистые породы, увеличиваясь в объеме во времени, способствуют отрыву слоев более прочных пород и формируют условия обрушения, что приводит к снижению устойчивости горных выработок и травмированию горнорабочих.

Достигнутый уровень травматизма по исследуемому опасному производственному фактору (за последние 10 лет удельный вес смертельного

травматизма при проведении и перекреплении выработок составляет около 32%, на сопряжении выработок – 11%) позволяет считать, что действующие меры по предотвращению обвалов и обрушений в угольной отрасли являются недостаточными. Значительное число завалов лав и подготовительных выработок связано с созданием аварийных ситуаций, которые происходили в результате нарушения горнорабочими требований ПБ при ведении горных работ по добыче угля, проведении и ремонте выработок и по неустановленным причинам.

Наиболее часто повторяющимися причинами аварий и несчастных случаев в результате обвалов и обрушений горных пород являются нарушения паспортов крепления (62%), несоответствие паспортов крепления горно-геологическим условиям (8%) и отсутствие или неисправность крепи (23%) [1]. Однако детальный анализ аварий позволяет сделать вывод о том, что во многих случаях не организационные причины, а недостаточная

изученность природы обрушений и, в связи с этим, принятие ошибочных технических решений, обуславливает травматизм по рассматриваемому опасному производственному фактору. Поэтому разработка эффективных мероприятий, направленных на повышение устойчивости боковых пород и горных выработок при разработке угольных пластов, будет способствовать не только эффективной отработке запасов, но и повышению безопасности труда горнорабочих.

#### Анализ исследований и публикаций

Традиционно считается, что проявления горного давления в выработках зависят от совокупного влияния многих горно-геологических факторов, к которым первоначально следует отнести напряженное состояние пород и их физико-механические свойства. Изучение особенностей проявления горного давления в выработках на большой глубине [2] позволило установить, что характер его опасных проявлений определяется не только напряженным состоянием массива 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.

Опыт работы шахт Донбасса показывает, что с ростом глубины горных работ в угольном массиве начинает проявляться такой природный фактор, как расслоения боковых пород, оказывающий существенное влияние на состояние горных выработок и приводящий к возможному травматизму, в результате обрушений расслоившихся пород. Подработанные и расслоившиеся породы непосредственной кровли, оседающие на хаотически обрушенные слои представляют собой блочный массив, состоящий из балок различной длины. Причем породы непосредственной кровли изгибаются и неконтролируемо оседают позади очистного забоя, создавая неблагоприятную геомеханическую обстановку. Установлено [3,4], что в зависимости от горно-геологических условий, зона расслоения боковых пород составляет по нормали к напластованию 4-8м. Негативные последствия создавшейся геомеханической обстановки могут проявляться в том, что основная кровля разрабатываемого пласта, не имея подпора в выработанном пространстве, внезапно обрушается, что способствует проявлению динамических нагрузок, нестационарных колебаний, а так же возможному завалу горных выработок [5].

Очевидно, возникающие в различных условиях колебания инженерных сооружений, к которым следует относить боковые породы, при неблагоприятных обстоятельствах, в т.ч. при внезапных обрушениях боковых пород, могут вызвать значительные деформации и напряжения, а так же их

разрушения. Поэтому понятие устойчивости рассматриваемых систем, тесно связано с учением о колебаниях [5-9].

В динамических задачах, в частности, в задачах о колебаниях, положение точек системы изменяется с течением времени и установленные координаты являются функциями времени [5,9]. Основная задача динамического исследования состоит в нахождении этих функций, т.е. в определении закона движения системы.

Эффективность отработки угольных пластов и безопасность ведения горных работ на шахтах Донбасса, в значительной степени зависит не только от состояния горных выработок, но и от способа управления кровлей в очистном забое. Как показало изучение процесса сдвижений и деформаций горных пород [10], при выемке пластов в нарушенной толще происходит образование характерных зон сдвижения, на динамику и параметры которых в значительной степени влияет способ управления кровлей в лаве. Наиболее интенсивно процесс сдвижения под- и надработанной толщи развивается и протекает при полном обрушении кровли в лавах или удержанием кровли на кострах, наименее интенсивно – при полной закладке выработанного пространства [3].

Исследованиями ДонУГИ и ДонНТУ ранее было установлено, что закладочный массив предотвращает развитие сдвижений горных пород в окрестности выработок и создает зоны устойчивости пород впереди и позади очистного забоя. Механизм взаимодействия закладочного массива с оседающими породами висячего бока заключается в закрытии над закладочным массивом трещин разлома пород кровли. При таком их взаимодействии с закладочным массивом уменьшается концентрация напряжений в призабойном пространстве и длина зоны проявлений опорного давления [10]. Очевидно, существенно изменить геомеханическую обстановку в окрестности горных выработок можно за счет размещения позади очистного забоя в выработанном пространстве податливой опоры. Это позволит осуществлять управление деформированными боковыми породами вблизи призабойного пространства и далеко позади лавы. Такой подход является одним из главных направлений повышения устойчивости горных выработок и создания безопасных условий труда горнорабочих [11].

В качестве параметрического обеспечения геомеханических расчетов устойчивости боковых пород, наиболее часто используются деформационные показатели, определяемые статическим методом приложения нагрузки. Однако при этом необходимо принимать во внимание ряд условий, для которых характерен динамический вид нагружения, с учетом показателей, учитывающих колебания рассматриваемых систем.

**Постановка задачи**

С целью изучения динамики боковых пород при их внезапном обрушении были проведены аналитические исследования с использованием основных положений теоретической механики, теории колебаний, механики контактных взаимодействий и теории упругости [12,13,16,17,20-25]. Было изучено влияние изгибных колебаний балок на состояние пород кровли разрабатываемого пласта при различных способах управления кровлей – полным обрушением (удержанием на кострах) и закладкой выработанного пространства. Колебания этого вида связаны с изгибной деформацией балок, т.е. колебаний груза на несущих балках. В качестве груза рассматриваются обрушившиеся боковые породы, а несущей балки – породы непосредственной кровли.

**Изложение материала и результаты**

На рис. 1а показана шарнирно опертая балка длиной  $l$ , (м), которая совершает изгибные колебания. К балке приложена сила  $P$ , (Н). Для составления уравнения движения воспользуемся известным принципом Д’Аламбера [12,14,15]. С этой целью выделим на некотором расстоянии  $x$  от начала координат бесконечно малый элемент длиной  $dx$  (рис.1а).

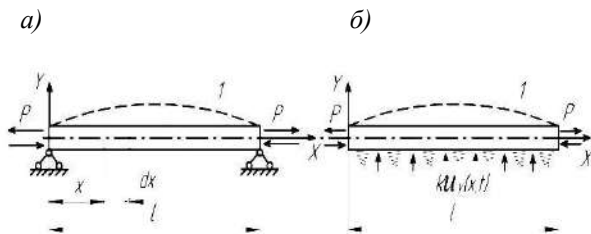


Рис. 1 – Расчетная схема к определению колебаний балки: а) неподвижная шарнирная опора; б) упругое основание: 1 – форма колебаний,  $l$  – длина балки, (м),  $kU_y(x,y)$  – реакция упругого основания,  $P$  – приложенная сила, (Н)

На рис. 2 показаны силы, действующие на бесконечно малый элемент в процессе колебания балки. При малых колебаниях нормальную силу  $N$  можно считать постоянной и равной внешней силе  $P$ . Однако угол между этими силами и осью  $X$  к сечению  $x+dx$  получает приращение.

Считаем, что

$$\cos \frac{\partial u_y}{\partial x} = 1 \text{ и } \sin \frac{\partial u_y}{\partial x} = \frac{\partial u_y}{\partial x}, \quad (1)$$

и приравняв нулю сумму проекций на ось  $Y$  всех сил, действующих на выделенный элемент, получим

$$-\frac{m_0 \partial^2 u_y}{\partial t^2} dx + Q_y - \left( Q_y + \frac{\partial Q_y}{\partial x} dx \right) + P \left( \frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} dx \right) - P \frac{\partial u_y}{\partial x} = 0, \quad (2)$$

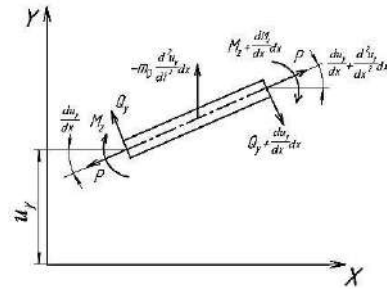


Рис. 2 – Силы, действующие на бесконечно малый элемент в процессе колебаний

или 
$$m_0 \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} + \frac{\partial Q_y}{\partial x} - P \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} = 0, \quad (3)$$

где  $m_0$  – погонная масса балки, (кг/м);  $Q_y$  – перерезывающая сила, (Н).

При условии равенства нулю момента всех сил, приложенных к выделенному бесконечно малому элементу, нормальные силы дают члены большого порядка малости, вследствие чего имеем соотношение

$$Q_y = \frac{\partial M_z}{\partial x} \quad (4)$$

где  $M_z$  – изгибающий момент (Н·м).

Воспользуемся дифференциальным уравнением упругой линии балки

$$M = EJ \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} \quad (5)$$

и выражение (3) принимает вид

$$m_0 \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} + EJ \frac{\partial^4 u_y}{\partial x^4} - P \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} = 0, \quad (6)$$

где  $J$  – осевой момент инерции поперечного сечения,  $m^4$ ;

что отвечает теории Бернулли-Эйлера [15].

Считаем, что рассматриваемая балка (рис. 1), совершает гармонические колебания. Тогда, частные решения (6) в форме

$$u_{yr}(x, t) = v_r(x) \sin(\omega t + \varphi), \quad (7)$$

относительно  $v_r(x)$  можно представить в виде линейного дифференциального уравнения вида

$$EJ v_r^{IV}(x) - P v_r^{II}(x) - m_0 \omega^2 v_r(x) = 0 \quad (8)$$

В результате различного вида действия осевой силы  $P$ , форму колебаний балки  $U_r(x)$ , которая

характеризует закон изменения амплитуд перемещений, можно представить в виде

$$u_r(x) = \sin \frac{\pi r}{l} x, \quad (9)$$

а 
$$v_r(x) = C_{2r} \sin \frac{\pi r}{l} x. \quad (10)$$

Тогда, с учетом этих выражений в (8) получим

$$EJ \left(\frac{\pi r}{l}\right)^4 + P \left(\frac{\pi r}{l}\right)^2 - m_0 \omega^2 = 0 \quad (11)$$

Из выражения (11)

$$\omega^2 = \frac{EJ}{m_0} \left(\frac{\pi r}{l}\right)^4 + \frac{P}{m_0} \left(\frac{\pi r}{l}\right)^2 \quad (12)$$

или 
$$\omega^2 = \frac{\pi^4 r^4 EJ}{m_0 l^4} \left(1 + \frac{Pl^2}{\pi^2 r^2 EJ}\right). \quad (13)$$

Согласно [5,16,17], при  $r = 1$ , выражение

$$P_{кр.} = \frac{\pi^2 r^2 EJ}{l^2}, \quad (14)$$

соответствует предельному значению силы, т.е. эйлеровой нагрузке. Доказано, что при  $P > P_{кр.}$ , в рассматриваемой системе имеет место бифуркация, т.е. ее разрушение [15].

При действии на балку растягивающей силы имеем

$$\omega = \omega_0 \sqrt{1 + \frac{P}{P_{кр.}}}, \quad (15)$$

где  $\omega_0$  – частота собственных колебаний балки,  $\frac{1}{c}$ .

В случае, когда к балке приложена сжимающая сила, то

$$\omega = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{P}{P_{кр.}}}, \quad (16)$$

Из чего следует, что при  $P_{сж.} = P_{кр.}$ , частота колебаний  $\vartheta = 0$ .

Выражение для определения величины осевых колебаний ( $\omega_0$ ) без действия определяется по выражению [17] и справедлива для балок с неподвижной шарнирной опорой и на упругом основании, [5,17] имеет

$$\omega_0 = \frac{\pi^2 r^2}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{m_0}}, \quad (17)$$

где  $E$  – модуль упругости пород непосредственной кровли – балки, Н/м<sup>2</sup>.

Возвращаясь к вышеизложенному, следует отметить, что формула Эйлера дает истинное значение нагрузки, при которой происходит потеря

устойчивости рассматриваемой системы в случае, когда ее гибкость больше или равна предельной гибкости самой системы. Показатель последней зависит от модуля упругости пород непосредственной кровли, т.е. физико-механических свойств пород. Обычно потеря устойчивости системы сопровождается перемещениями, возникновением пластических деформаций или разрушением. Доказано [15,17], что возможны случаи, когда система потеряв устойчивость, переходит в режим колебаний.

На рис.3 представлена корреляция величины эйлеровой нагрузки от длины балки – пород непосредственной кровли. Кривая 1 характеризует границу бифуркации, за пределами которой находится зона неустойчивых пород (А). Отмечено, что при минимальной длине балки, рассматриваемая система в зависимости от действия усилии выдерживает максимильные значения максимильных нагрузок. С увеличением длины балки, статический прогиб последней увеличивается, а, следовательно, в таких условиях рассматриваемая система испытывает действие дополнительных нагрузок в виде изгибающих усилии. Зона А находится за пределами границы и характеризует зону неустойчивого состояния пород кровли, в результате действия различной направленности нагрузок. По сути, в зоне А, с момента наступления критического состояния до момента разрушения, деформации системы нарастают крайне быстро. Из этого следует, что при расчете на устойчивость пород непосредственной кровли, критическая нагрузка всегда будет подобна разрушающей в результате действия в них различных усилии (растягивающих, сжимающих, изгибающих).

Данный подход справедлив для балок с неподвижной шарнирной опорой или на упругом основании.

Теперь рассмотрим балку, лежащую на упругом основании типа Винклера [5,15,16]. Считаем, что в процессе колебаний балка не может оторваться от упругого основания (рис.1,б). Со стороны основания на колеблющуюся балку действует реакция

$$q_y(x, t) = -k u_y(x, t), \quad (18)$$

где  $k$  – коэффициент постели упругого основания.

Коэффициент постели упругого основания определяется исходя из рекомендаций [16].

Для рассматриваемой балки дифференциальное уравнение колебаний можно записать, согласно [5,15] в виде

$$m_0 \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} + EJ \frac{\partial^4 u_y}{\partial x^4} = q_y. \quad (19)$$

С учетом свободных колебаний балки выражение (20) принимает вид

$$m_0 \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} + EJ \frac{\partial^4 u_y}{\partial x^4} + k u_y = 0 \quad (20)$$

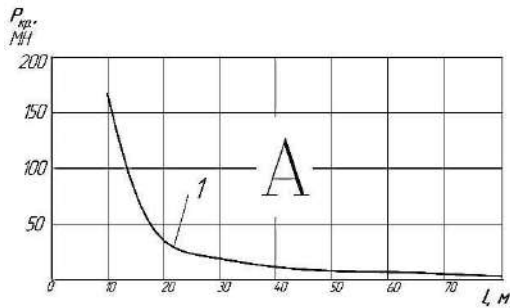


Рис. 3 - Изменение величины эйлеровой нагрузки ( $P_{кр}$ , МН) от длины балки ( $l$ , м): А – зона неустойчивого состояния системы; кривая 1 – граница бифуркации

Полученное выражение описывает изгибные колебания подпружиненной балки модели Бернулли-Эйлера [15].

С учетом амплитуд перемещений

$$u_{y,r}(x, t) = v_r(x) \sin(\omega t + \varphi) \quad (21)$$

получим обыкновенное линейное дифференциальное уравнение

$$EJ v_r^{IV}(x) - (m_0 \omega^2 - k) v_r(x) = 0 \quad (22)$$

Или

$$v_r^{IV}(x) - \alpha_r^4 v_r(x) = 0, \quad (23)$$

при условии, что

$$\alpha_r^4 = \frac{m_0 \omega^2 - k}{EJ}. \quad (24)$$

Следует отметить, что выражение (23) совпадает с видом уравнения свободных колебаний балки постоянного сечения [17]. Частными решениями этого выражения являются функции  $ch \alpha_r x$ ,  $sh \alpha_r x$ ,  $\cos \alpha_r x$  и  $\sin \alpha_r x$ . Тем не менее, при исследовании колебаний балки, лежащей на упругом основании, за частные решения, целесообразно принимать функции А.Н. Крылова [15-17].

Рассмотрим случай, когда к концам рассматриваемой балки приложены растягивающие силы  $P$  (рис. 1б), тогда с учетом (11) дифференциальное уравнение свободных колебаний балки имеет вид

$$m_0 \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} + EJ \frac{\partial^4 u_y}{\partial x^4} - \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + k u_y = 0, \quad (25)$$

а частное решение этого уравнения можно записать как

$$EJ v_r^{IV}(x) - P v_r^{II}(x) - (m_0 \omega^2 - k) v_r(x) = 0. \quad (26)$$

Учитывая форму колебаний

$$v_r(x) = C_{2r} \sin \frac{\pi r}{l} x, \quad (27)$$

после соответствующих преобразований имеем

$$EJ \left(\frac{\pi r}{l}\right)^4 + P \left(\frac{\pi r}{l}\right)^2 - m_0 \omega^2 + k = 0. \quad (28)$$

окончательно получим

$$\omega = \omega_0 \sqrt{\left(1 + \frac{P}{P_{кр}}\right) + \frac{k}{m_0}}, \quad (29)$$

А в случае действия сжимающей силы

$$\omega = \omega_0 \sqrt{\left(1 - \frac{P}{P_{кр}}\right) + \frac{k}{m_0}}. \quad (30)$$

Учитывая то, что период колебательного движения рассматриваемой системы можно определить как [5,6]

$$T = \frac{2\pi}{\omega}, \quad (31)$$

выполним расчеты для ее различного состояния, т.е. при различной длине балки – непосредственной кровли. Последняя имеет шарнирно-неподвижную опору или упругое основание. Вообще, колебательное свойство рассматриваемой системы не следует комбинировать с признаком периодичности, т.к. внезапно возникающие динамические нагрузки не обладает свойством тактовой повторяемости.

На рис. 4а,б,в приведены зависимости, отражающие изменение частоты и периода колебаний балки – непосредственной кровли от ее длины при различных видах опор и с учетом отсутствия или действия сжимающих (1а, 2б) (растягивающих 3б, 4б) усилий. Причем последние соответствовали величине  $P=0,6P_{кр}$ .

Установлено, что во всех рассматриваемых случаях, с увеличением длины балки частота ее колебаний уменьшается, а период колебаний увеличивается. Такая тенденция имеет место и в случае свободного опирания балки, при отсутствии вдоль ее оси растягивающих или сжимающих усилий (рис. 4а). В случае, когда балка имеет неподвижную шарнирную опору (рис. 4б), и на нее действуют сжимающие или растягивающие усилия, частота и период колебаний такой балки в сравнимых условиях различается в 2 раза (рис. 4б). Для балки с опорой на закладочный массив, имеем условия, при которых частота и период колебаний совпадают, вне зависимости то того подвержена балка действию сжимающих или растягивающих усилий (рис. 4а).

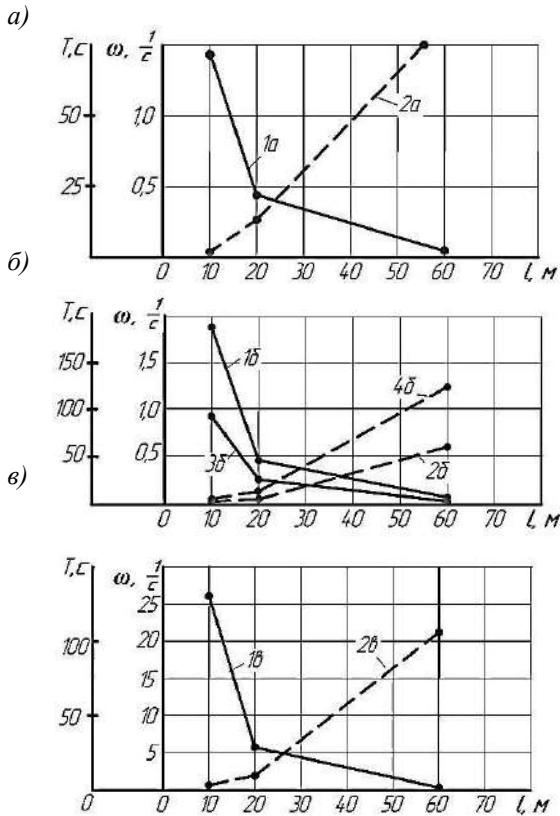


Рис. 4 - Изменение круговой частоты ( $\omega$ ,  $\frac{1}{c}$ ) и периода, ( $T$ , с) колебания балки – непосредственной кровли от ее длины ( $l$ , м); а) с неподвижной шарнирной опорой и на упругом основании, без действия осевой силы: 1а, 2а – соответственно частота и период колебаний; б) с неподвижной шарнирной опорой, при действии сжимающих или растягивающих усилий, когда  $P=0,6P_{кр}$ : 1б, 2б, 3б, 4б – соответственно частота и период колебаний при сжатии и растяжении; в) на упругом основании, при действии сжимающих или растягивающих усилий, когда  $P=0,6P_{кр}$ : 1в, 2в – соответственно частота и период колебаний при сжатии и растяжении.

Теперь определим период колебаний рассматриваемой системы, когда нагрузка в виде обрушившихся боковых пород, движется вдоль балки (рис.4). Период свободных колебаний такой балки можно определить согласно [18]

$$T = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{m}{m+m_k}}, \quad (32)$$

где  $\omega$  – частота колебаний,  $\frac{1}{c}$ ;  $m$  – масса балки, кг;  $m_k$  – приведенная к середине балки масса обрушившихся пород, кг.

Значение  $m_k$  можно определить по выражению

$$m_k = -\frac{q_n l}{\pi} \left( \cos \frac{\pi x_2}{l} - \cos \frac{\pi x_1}{l} \right), \quad (33)$$

где  $x_1, x_2$  – координаты размещения обрушившихся пород на балке, м;  $q_n$  – погонная нагрузка, Н/м.

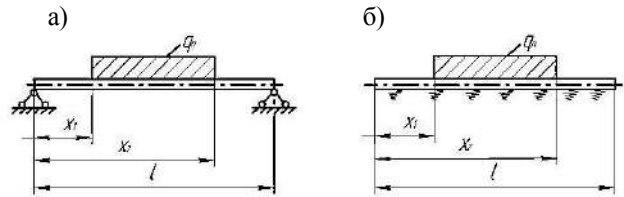


Рис. 5 – Схема к расчету периода колебаний для балки; а) с неподвижной шарнирной опорой; б) на упругом основании:  $l$  – длина балки, м;  $x_1, x_2$  – координаты расположения обрушившихся пород, м;  $q_n$  – погонная нагрузка, Н/м.

Частота колебаний в данном случае, определяется согласно [17]:

- для балки с неподвижной шарнирной опорой

$$\omega = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{\delta_{ст}}}, \quad (34)$$

где  $\delta_{ст}$  – статический прогиб балки, м;

- для балки на упругом основании как

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m_k}}, \quad (35)$$

где  $k$  – коэффициент упругого основания.

На рис. 6 представлена корреляция изменения периода колебаний балки – пород непосредственной кровли от ее длины. При этом учитывался вид опор и влияние движения обрушившихся пород вдоль балки. В результате выполненных исследований установлено, что при увеличении длины балки, период колебаний увеличивается.

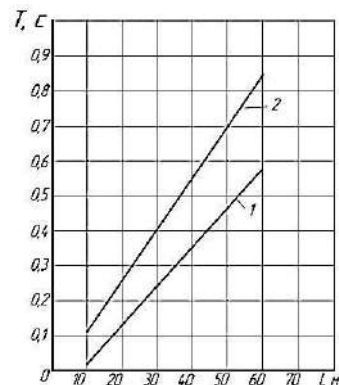


Рис. 6 – Изменение периода колебаний ( $T$ , с) балки – пород непосредственной кровли с учетом вариации длины ( $l$ , м): 1 – с неподвижной шарнирной опорой; 2 – на упругом основании.

Причем максимальные значения исследуемой величины, когда  $T=0,86$ сек, соответствует балке длиной  $l=60$ м, лежащей на упругом основании. Для балки такой же длины, но имеющей неподвижные шарнирные опоры, период колебаний составляет  $T=0,53$ сек, что почти на 30% меньше. Очевидно, объяснить это можно реакцией упругого основания на перемещения вдоль балки обрушившихся пород.

Далее рассмотрим движение точки тела, с учетом обрушившихся на балку боковых пород, при ее гармоническом возбуждении, когда тело вывели из состояния равновесия. Координаты точки тела в таких условиях можно определить по выражению [19,24,25]:

- для балки с неподвижной шарнирной опорой

$$x = \delta_{ст.} \cdot t \cdot \sin \omega t, \quad (36)$$

где  $\delta_{ст.}$  – статический прогиб балки, м;

- для балки на упругом основании

$$x = \frac{m_k}{2m\omega^2} \cdot t \cdot \sin \omega t, \quad (37)$$

где  $\omega = 2\pi\nu$  – угловая или круговая частота,  $\frac{1}{с}$ .

На рис. 7а,б,в,г представлены зависимости изменения координат точки тела в результате гармонических колебаний при различной длине балки – пород непосредственной кровли, которая опирается на неподвижную шарнирную опору (а,б) и на упругое основание - закладочный массив (в,г). Такие колебания представляют собой волновой процесс, распространяющийся в массиве с некоторой скоростью.

Анализируя результаты выполненных исследований, можно заключить, что отклонения координаты точки тела (x, м) от равновесного состояния для балки, имеющей неподвижную шарнирную опору при длине  $l=10$ м составляет  $x=0,003$ м, а для балки  $l=20$ м -  $x=0,12$ м (рис.7а,б). В случае, когда балки такой длины имеют под собой упругое основание - закладочный массив, отклонения составляют, соответственно,  $x=0,0004$ м и  $x=0,0055$ м.

На рис.8 балка длиной 60м (кривая 1), имея максимальный прогиб и неподвижную шарнирную опору, находится в наиболее худших условиях, чем балка, опирающаяся на закладочный массив (кривая 2). Изменение координат точек тела в случае, когда балка имеет неподвижную шарнирную опору, происходит скачкообразно, с резким отклонением от положения равновесия.

В случае, когда балка имеет упругое основание, изменение координат точек тела происходит плавно, с растяжкой во времени. Максимальные значения отклонений координаты точек тела от равновесного состояния составляют для случая 1 -  $x=1,5$ м, а для случая 2 -  $x=0,4$ м (рис.8). Объяснить это можно, прежде всего, откликом упругого полупространства, т.е. закладочного массива, на осциллирующую силу, приложенную к рассматриваемой системе.

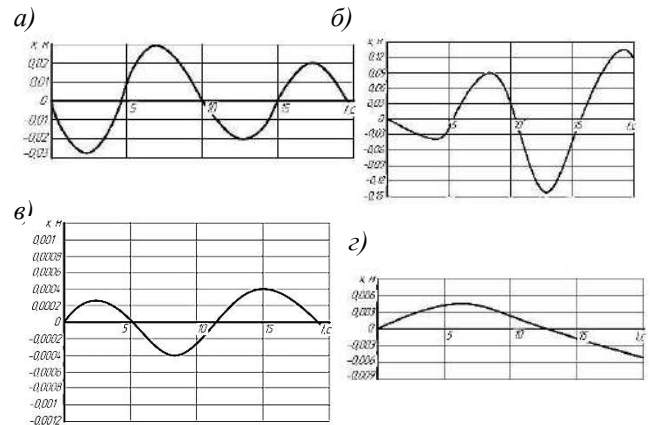


Рис. 7 - Изменение координат точки тела в результате гармонических колебаний при различной длине балки с неподвижной шарнирной опорой (а,б) и на упругом основании (в,г): а), в)  $l=10$ м, б), г)  $l=20$ м.

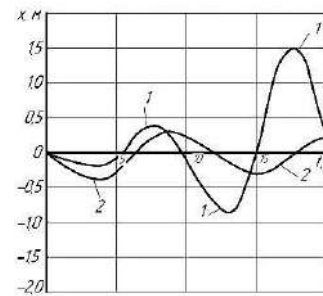


Рис. 8 - Изменение координат точки тела при длине балки  $l=60$ м с неподвижной шарнирной опорой (1) и на упругом основании (2)

Таким образом, при разработке угольных пластов на больших глубинах, в результате расслоения боковых пород, опасность возникновения аварийных ситуаций исходит от обвалов и обрушений пород кровли. С точки зрения геомеханики, при таком положении расслоившиеся породы непосредственной кровли изгибаясь, создают неблагоприятную геомеханическую обстановку в окрестности горных выработок. Очевидно, при определенных параметрах зависящей консоли и отсутствии эффективного подпора со стороны выработанного пространства, впоследствии внезапных обрушений боковых пород или осадки основной кровли, вероятность завала горных выработок возрастает. Применение закладки выработанного пространства или широких податливых полос, со стороны выработанного пространства, при минимальном отставании от очистного забоя, позволит существенно изменить геомеханическую обстановку в лучшую сторону.

### Вывод

В сложных горно-геологических условиях разработки угольных пластов Донбасса с учетом

установленной динамики боковых пород при их внезапном обрушении, необходимо ориентироваться на способ управления кровлей полной закладкой выработанного пространства или (что предпочтительней из условий трудоемкости процесса) на применение широких податливых полос. Закладочный массив или податливые опоры, на которые опираются породы непосредственной и основной кровли в результате их расслоения, устраняют негативные явления, проявляющиеся в углепородном массиве при внезапных обрушениях боковых пород или посадке основной кровли. Такие решения позволяют повысить устойчивость подготовительных выработок и, как следствие, снизить уровень травматизма горнорабочих от обвалов и обрушений.

#### Список литературы

1. **Левкин, Н. Б.** Предотвращение аварий и травматизма в угольных шахтах Украины / **Н. Б. Левкин** // Монография. – Донецк: Донбасс, 2002. – 393 с.
2. **Николин, В. И.** Снижение травматизма от проявлений горного давления / **В. И. Николин, С. В. Подкопаев, А. В. Агафонов.** – Донецк: Норд-Пресс. 2005. – 232 с.
3. **Андрушко, В. Ф.** Управление кровлей в сложных горно-геологических условиях / **В. Ф. Андрушко, С. А. Саракитянец, Ю. Г. Спицын.** – К.: Техника, 1985. – 372 с.
4. **Авершин, С. Г.** Сдвигение горных пород при подземных разработках. / **С. Г. Авершин** – М.: Углетехиздат, 1947. – 208 с.
5. **Пановко, Я. Г.** Основы прикладной теории колебаний и удара / **Я. Г. Пановко** – Л.: Машиностроение, 1976. – 320 с.
6. **Richart, F. E.** Comparison of footing vibration tests with theory / **F. E. Richart, R. V. Whitman** // *J. Soil Mech. and Found. Div. ASCE.* – 1967. – №93, 6. – P.143-168.
7. **Ehrler, O.** Nonlinear parameters of vibrating foundations / **O. Ehrler** // *J. Soil Mech. and Found. Div. ASCE.* – 1968. – №94, 6. – P. 1091-1214.
8. **Novak Miles.** Prediction of footing vibrations / **Miles Novak** // *J. Soil Mech. and Found. Div. ASCE.* – 1970. – №96, 3 – P. 837-861.
9. **Паппард, А.** Физика колебаний / **А. Паппард.** М.: Высшая школа, 1985. – 456 с.
10. **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.
11. **Пугач, И. И.** Исследования устойчивости боковых пород в сложных горно-геологических условиях / **И. И. Пугач, С. В. Подкопаев, И. В. Иорданов, Д. А. Чепига** // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ».* Збірник наукових праць. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Х.: НТУ «ХПІ». 2016. – №42(1214) – с. 111-116. doi:10/20998/2416-4295.2016.42.18
12. **Жирнов, Н. И.** Классическая механика / **Н. И. Жирнов** – М.: Просвещение, 1980. – 303 с.
13. **Бидерман, В. Л.** Теория механических колебаний / **В. Л. Бидерман.** – М.: Высшая школа, 1980. – 408 с.
14. **Раус, Э.** Динамика системы твердых тел. Т.1 / Под ред. **Ю. А. Архангельского, В. Г. Демина.** – М.: Наука, 1983. – 464 с.
15. **Циглер, Ф.** Механика твердых тел и жидкостей / **Ф. Циглер** – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2002. – 912 с.
16. **Тимошенко, С. П.** Сопrotивление материалов. Т.2. / **С. П. Тимошенко** – М.: Наука, 1965. – 480 с.
17. **Тимошенко, С. П.** Колебания в инженерном деле / **С. П. Тимошенко, Д. Х. Янг, У. Унвер** – М.: Машиностроение, 1985. – 472 с.
18. **Бондарь, Н. Г.** Динамика железнодорожных мостов / **Бондарь Н. Г., Казей И. И., Лесохин Б. Ф.** – М.: Транспорт, 1965. – 416 с.
19. **Смолин, И. Ю.** Аналитическая динамика и теория колебаний / **И. Ю. Смолин, В. В. Караулов** – Томск: Томский гос. ун-т, 2012. – 172 с.
20. **Джонсон, К.** Механика материалов / **К. Джонсон** – СПб: Изд-во «Лань», 2002. – 672 с.
21. **Adarwal, R. P.** Discrete Oscillation Theory / **R. P. Adarwal, M. Bohner, S. R. Gracw, D. O`Regan** // *Hindwai Publishing Corporation.* – 2005. – 951 p.
22. **Baddaour, N.** Recent Advances in vibrations Analysis / **Baddaour N.** Rijeka, Croatia, 2011. – 236 p.
23. **Ebrahimi, F.** Advances in Vibration / analisis Research / **F. Ebrahimi.** – InTech, 2011. – 456 p.
24. **Bottega, W. I.** Engineering Vibrations / **W. I. Bottega.** – CRC Press, Taylor Francis Group, 2006. – 727p.
25. **Meirovitch, L.** Fundamentals of Vibrations / **L. Meirovitch.** Mc Graw-Hill, 2001 – 806 p.

#### Bibliography: (transliterated)

1. **Levkin, N. B.** Predotvrachenie avariy i travmatizma v ugolnyih shahtah Ukrainyi. Monografiya. Donetsk: Donbass, 2002, 393 p.
2. **Nikolin, I. V. Podkopaev, S. V., Agafonof, A. V.** Snizhenie travmatizma ot projavlenij gornogo davlenija. Doneck: Nord-Press. 2005, 232 p.
3. **Andrushko, V. F., Sarakitjanc, S. A., Spicyn, Ju. G.** Upravlenie krovlej v slozhnyh gorno-geologicheskikh uslovijah. K.: Tehnika, 1985, 372 p.
4. **Avershin, S. G.** Sdvizhenie gornijh porod pri podzemnyih razrabotkah. M.: Ugletehzdat, 1947, 208 p.
5. **Panovko, Ya. G.** Osnovy prikladnoy teorii kolebaniy i udara. L.: Mashinostroenie, 1976, 320 p.
6. **Richart, F. E., Whitman, R. V.** Comparison of footing vibration tests with theory. *J. Soil Mech. and Found. Div. ASCE*, 1967. № 93, 6, 143-168.
7. **Ehrler, O.** Nonlinear parameters of vibrating foundations. *J. Soil Mech. and Found. Div. ASCE*, 1968. 94, 6, 1091-1214.
8. **Novak Miles.** Prediction of footing vibrations. *J. Soil Mech. and Found. Div. ASCE*, 1970. 96, 3, 837-861.
9. **Pappard, A.** Fizika kolebaniy. M.: Vysshaya shkola, 1985, 456 p.
10. **Zhorshhik, M. P., Podkopaev, S. V.** Mehanizm povysheniya ustojchivosti krovli v lavah pri primenenii zakladki vyrabotannogo prostranstva // *Ugol' Ukrainy*, 1992, № 5, 20-23.
11. **Pugach, I., Podkopaev, S., Iordanov, I., Chepiga, D.** Investigation of the stability of wall rocks in difficult mining and geological conditions. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, 42 (1214), 111-116, doi: 10/20998/2416-4295.2016.42.18.
12. **Zhirnov, N. I.** Klassicheskaya mehanika. M.: Prosveschenie, 1980, 303 p.
13. **Biderman, V. L.** Teoriya mehanicheskijh kolebaniy. M.: Vysshaya shkola, 1980, 408 p.



14. **Raus, E.** Dinamika sistemyi tverdyih tel. T.1. Pod red. Yu. A. Arhangel'skogo, V. G. Demina. M.: Nauka, 1983, 464 p.
15. **Tsigler, F.** Mehanika tverdyih tel i zhidkostey. Izhevsk: NITs «Regulyarnaya i haoticheskaya dinamika», 2002, 912 p.
16. **Timoshenko, S. P.** Soprotivlenie materialov. T.2. M.: Nauka, 1965, 480 p.
17. **Timoshenko, S. P., Yang, D. H., Unver, U.** Kolebaniya v inzhenernom dele. M.: Mashinostroenie, 1985, 472 p.
18. **Bondar, N. G., Kazey, I. I., Lesohin B. F.** Dinamika zheleznodorozhnyih mostov. M.; Transport, 1965, 416 p.
19. **Smolin, I. Yu., Karaulov, V. V.** Analiticheskaya dinamika i teoriya kolebaniy. – Tomsk: Tomskiy gos. un-t, 2012, 172 p.
20. **Dzhonson, K.** Mehanika materialov. SPb.: Izd-vo «Lan», 2002, 672 p.
21. **Adarwal, R. P., Bohner, M., Gracw, S. R., O'Regan D.** Discrete Oscillation Theory. *Hindwai Publishing Corporation*. 2005. 951 p.
22. **Baddaour, N.** Recent Advances in vibrations Analysis. Rijeka, Croatia, 2011. 236 p.
23. **Ebrahimi, F.** Advances in Vibration /analysis Research. InTech, 2011. 456 p.
24. **Bottega W. I.** Engineering Vibrations. CRC Press, Taylor Francis Group, 2006. 727 p.
25. **Meirovitch, L.** Fundamentals of Vibrations. Mc Graw-Hill, 2001 – 806 p.

#### Сведения об авторах (About authors)

**Коломиец Владимир Алексеевич** – директор, шахтоуправление «Южнодонбасское №1», г. Угледар, Украина; e-mail: ugnodon1@gmail.ru.

**Vladimir Kolomiets** – manager, mine management «Yuzhnodonbasskoe №1», Ugledar, Ukraine; e-mail: ugnodon1@gmail.ru.

**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.

**Daria Chepiga** – graduate student, Public higher education institution Donetsk National Technical University, Pokrovsk, Ukraine; e-mail: daria.chepiha@donntu.edu.ua.

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

**Igor Iordanov** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Applicant, Public higher education institution Donetsk National Technical University, Pokrovsk, Ukraine; e-mail: gendir@eme.kiev.ua.

**Власенко Николай Николаевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрическая инженерия», Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет», г. Покровск, Украина; e-mail: nikola\_v@mail.ru.

**Nikolay Vlasenko** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Public higher education institution Donetsk National Technical University, Pokrovsk, Ukraine; e-mail: nikola\_v@mail.ru.

**Александров Сергей Сергеевич** – кандидат технических наук, Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет», г. Покровск, Украина, e-mail: daria.chepiha@donntu.edu.ua.

**Sergey Aleksandrov** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Public higher education institution Donetsk National Technical University, Pokrovsk, Ukraine; e-mail: daria.chepiha@donntu.edu.ua.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Коломиец, В. А.** О динамике боковых пород при их внезапном обрушении / **В. А. Коломиец, Д. А. Чепига, И. В. Иорданов, Н. Н. Власенко, С. С. Александров** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* Харьков: НТУ «ХПИ». – 2017. – № 7 (1229) . – С. 64-72. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.09.

*Please cite this article as:*

**Kolomiets, V., Chepiga, D., Iordanov, I., Vlasenko, N., Aleksandrov, S.** About dynamics of side rock in their sudden collapse. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* Kharkiv: NTU "KhPI", 2017, 7 (1229), 64–72, doi:10.20998/2413-4295.2017.07.09.

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Коломієць, В. О.** Про динаміку бічних порід при їх раптовому обваленні / **В. О. Коломієць, Д. А.Чепіга, І. В. Іорданов, М. М. Власенко, С. С. Александров** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* Харків: НТУ «ХПІ». – 2017. – № 7 (1229) . – С. 64-72. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.09.

**АНОТАЦІЯ** В результаті проведених аналітичних досліджень, з метою вивчення динаміки бічних порід при їх раптовому обваленні, отримані залежності зміни частоти, періоду коливальних і координат точок тіла (балки - безпосередньої покрівлі) у випадку спирання на нерухому шарнірну опору і на пружну основу. Зроблено висновки, що при розробці пластів в складних гірничо-геологічних умовах на великих глибинах краще застосовувати повну закладку виробленого простору або широкі податливі смуги, що дозволить знизити рівень травматизму гірників.

**Ключові слова:** травматизм; гірничий тиск; коливання; динаміка бічних порід; закладний масив; піддатлива опора

*Поступила (received) 03.03.2017*