

УДК 622.834:622.862.3

doi:10.20998/2413-4295.2018.16.05

## О ВЛИЯНИИ ИЗГИБНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ НА СОСТОЯНИЕ КРОВЛИ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА ПРИ ВНЕЗАПНЫХ ОБРУШЕНИЯХ ПОРОДНОЙ ТОЛЩИ\*

И. В. ИОРДАНОВ<sup>1</sup>, Д. А. ЧЕПИГА<sup>1\*</sup>, В. А. КОЛОМИЕЦ<sup>2</sup>, Е. С. ПОДКОПАЕВ<sup>3</sup>,  
А. В. КОРОЛЬ<sup>4</sup>, В. Ю. ДОВГАЛЬ<sup>5</sup>

<sup>1</sup> ГВУЗ «ДонНТУ» МОН Украины, г.Покровск, УКРАИНА

<sup>2</sup> ШУ «Южнодонецкое №1», г.Угледар, УКРАИНА

<sup>3</sup> Силезский технический университет, г.Гливице, ПОЛЬША

<sup>4</sup> ПСП «Шахтоуправление «Добропольское» ООО «ДТЭК Добропольеуголь»», г.Доброполье, УКРАИНА

<sup>5</sup> Шахтоуправление «Мирноградуголь», г.Мирноград, УКРАИНА

\* email [daria.chepiha@donntu.edu.ua](mailto:daria.chepiha@donntu.edu.ua)

**АННОТАЦИЯ** Экспериментально установлено, что демпфирующая способность закладочного массива, который является податливым основанием для кровли угольного пласта при его разработке, оказывает существенное влияние на поведение боковых пород в окрестности горной выработки при внезапных обрушениях расслоившейся толщи или посадках основной кровли. В результате действия на кровлю внешней силы, при пустотности закладочного массива  $M \leq 20\%$ , когда обеспечивается его минимальная жесткость, амплитуда колебаний рассматриваемой системы становится максимальной. Доказано, что при увеличении жесткости закладочного массива в 5 раз, когда его пустотность уменьшается, а насыпная плотность увеличивается, рассматриваемая система максимально поглощает энергию деформирования. В таких условиях увеличивается ее добротность, число фиксированных колебаний и уменьшается промежуток времени, между моментом приложения внешней силы и достижением максимального прогиба кровли, а сама система становится более чувствительной к воздействию такой силы и разрушению. Коэффициент демпфирования при этом, характеризует темп относительного затухания колебаний в единицу времени и зависит от амплитуды колебаний. Более жесткое основание закладочного массива, пустотность которого  $M \leq 6\%$ , ухудшает устойчивость рассматриваемой системы, а для нормального ее функционирования необходимо, чтобы закладочный массив состоял из неоднородных по размеру частиц разрыхленной горной породы или имел пустотность  $M = (9-20)\%$  при уменьшении насыпной плотности.

**Ключевые слова:** демпфирующая способность; обрушение; пустотность; закладочный массив; податливая опора.

## ON THE INFLUENCE OF BENDING DEFORMATIONS ON THE CONDITION OF THE ROOF OF A COAL PLAST WITH EXTREMELY BREAKS OF BROWN THICKNESS\*

I. IORDANOV<sup>1</sup>, D.CHEPIGA<sup>1\*</sup>, V. KOLOMIIEC<sup>2</sup>, Y. PODKOPAIIEV<sup>3</sup>, A. KOROL<sup>4</sup>, V. DOVHAL<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Public higher education institution Donetsk National Technical University, Pokrovsk, UKRAINE

<sup>2</sup> Shakhtoupravlenie "Yuzhnodonbasskoye №1", Ugledar, UKRAINE

<sup>3</sup> Silesian University of Technology, Gliwice, POLAND

<sup>4</sup> Production structure of the enterprise "Mine management "Dobropolskoe" LLC "DTEK Dobropolyeugol", Dobropole, UKRAINE

<sup>5</sup> Mine management "Mirnogradugol", Mirnograd, UKRAINE

**ABSTRACT** It has been experimentally established that the damping capacity of the filling massif, which is a compliant base for the roof of the coal seam in its development, has a significant effect on the behavior of the lateral rocks in the vicinity of the mine workings during sudden collapse of the stratified strata or plantings of the main roof. Experimental studies of its bending deformations on models of equivalent materials were carried out. As a result of the action on the roof of the external force, with the voiding of the filling massif  $M \leq 20\%$ , when its minimum rigidity is ensured, the amplitude of the oscillations of the system under consideration becomes maximum. It is proved that when the stiffness of the filling massif is increased 5 times, when its cavitation decreases, and the bulk density increases, the system under consideration absorbs the deformation energy as much as possible. Under such conditions, its Q-factor, the number of fixed oscillations, and the time interval between the application of the external force and the maximum deflection of the roof are increased, and the system becomes more sensitive to such force and destruction. The damping coefficient in this case characterizes the rate of relative damping of the oscillations per unit time and depends on the amplitude of the oscillations. A more rigid base of the backfill array, whose cavitation  $M \leq 6\%$ , worsens the stability of the system under consideration, and for its normal functioning it is necessary that the packing array consist of uneven particle-sized loosened rock or has a cavitation  $M = (9-20)\%$  with decreasing bulk density.

**Keywords:** shock absorption; caving; cavitation; filling mass; foil bearing.

### Введение

Опыт работы шахт украинского Донбасса показывает, что с ростом глубины горных работ в

углепородном массиве, вмещающем горные выработки, начинает проявляться такой природный фактор как расслоение толщи, оказывающий

\*Работа выполняется под научно-методическим руководством докт.техн.наук, проф. Подкопаева С.В. и канд. физ.-мат. наук, доц. Конопелько Е.И., ГВУЗ «ДонНТУ» МОН Украины

существенное влияние на последующее поведение боковых пород. Особенно это прослеживается при разработке угольных пластов в сложных горно-геологических условиях и тогда, при принятии ошибочных технических решений, обрушения боковых пород, приводят к завалу горных выработок и возможному травматизму горнорабочих.

Как показало изучение процесса сдвижений и деформаций боковых пород [1,2], при выемке угля в нарушенной толще, происходит образование характерных зон сдвижения, на параметры которых в значительной степени влияет способ управления кровлей в лаве и охраны штреков. Известно [3], что наиболее эффективно на состояние боковых пород, а, следовательно, и горных выработок, оказывает способ управления кровлей закладкой выработанного пространства. Но в силу различных причин, этот способ в настоящее время не применяется, хотя в результате его использования, при внезапных обрушениях и посадках пород кровли, горные выработки находились в эксплуатационном состоянии в течении всего срока их службы [4].

В зависимости от горно-геологических и горно-технических условий разработки угольных пластов, на практике приходится встречаться с различным видом нагружения боковых пород. В большинстве случаев, в качестве параметрического обеспечения геомеханических расчетов устойчивости пород кровли, как основного грузонесущего элемента угленосного массива, используются ситуации, определяемые статическим методом приложения нагрузки. Однако ряд событий, к которым следует относить внезапные посадки кровли или обрушения расслоившейся толщи, характеризуются приложением динамических нагрузок, которые следует рассматривать как ударные явления и которые иначе, чем статические нагрузки, действуют на боковые породы.

#### Анализ исследований и публикаций

При изучении ударных явлений, к динамическому воздействию на кровлю угольного пласта следует относить удар, который представляет собой совокупность явлений в результате столкновения двух тел, когда осуществляется как упругое, так и пластическое их деформирование [5,6]. Механическая энергия к концу удара обычно восстанавливается лишь частично, вследствие потерь на образование остаточных напряжений и деформаций. Эти частичные потери энергии при расчетах учитываются введением коэффициента восстановления при ударе, зависящего от физико-механических свойств материала [7]. Отличие значений коэффициента восстановления от единицы, обусловлено вызванными пластическими

деформациями на основе предположения локализации деформаций вблизи поверхности взаимодействующих объектов [5,8].

Характерной особенностью динамических нагрузок является то, что в результате ударного воздействия на боковые породы, в них возникают колебания. В динамических задачах, в частности в задачах о колебаниях, положение точек рассматриваемой системы изменяется с течением времени, а установленные координаты являются функциями времени [8,9,10]. Основная задача такого исследования состоит в определении этих функций, т.е. в нахождении закона движения изучаемой системы, что позволит определить характер напряженно-деформированного состояния боковых пород, а, следовательно, состояние кровли угольного пласта и горных выработок.

Учитывая то, что ударные явления представляют собой динамический процесс и являются частью аварийных ситуаций, необходимо изучить природу и поставить пороговые условия возникновения и протекания этого процесса.

В динамическом поведении сооружений, огромную роль играет наличие податливого основания и его демпфирующая способность, которая приводит к сглаживанию напряжений при ударе [11,12]. Тем не менее, необходимо оценить эту способность, предварительно изучив природу поглощения энергии при колебаниях.

Многие практические задачи о колебаниях систем могут быть сформулированы как динамические задачи теории упругости. Однако, уравнения теории упругости описывают поведение системы в реальных условиях приближенно. Но при малых колебаниях, как об этом свидетельствуют исследования [8,13,14,15], наблюдается удовлетворительное соответствие между данными экспериментов и теорией.

#### Постановка задачи

С целью изучения состояния кровли угольного пласта, представленной в виде породной консольной балки, которая опирается на закладочный массив различной жесткости, при действии в таких условиях на балку ударных нагрузок в виде обрушений породного блока, нами были проведены экспериментальные исследования ее изгибных деформаций на моделях из эквивалентных материалов.

#### Изложение основного материала

В реальных условиях при изучении изгибных деформаций кровли разрабатываемого угольного пласта, которая поддерживается закладочным массивом – податливой опорой, в результате внезапных посадок основной кровли или обрушений

боковых пород, из-за труднодоступности выполнения замеров для получения экспериментальных данных, исследуемые объекты заменяются моделями. Исследования на моделях из эквивалентных материалов были проведены на специальном стенде (рис.1), 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  $m_6=1,37$  кг, модуль упругости  $E=8747$  МПа, плотность  $\rho=2095$  кг/м<sup>3</sup>. Балка была изготовлена из песчано-цементной смеси, согласно рекомендаций [16,17,18,19,20] и нагружалась внешней силой  $F$ , (Н) и собственным весом  $G$ , (Н). Один конец балки был жестко защемлен, другой опирался на закладочный массив различной жесткости  $C$ , (Н/м).

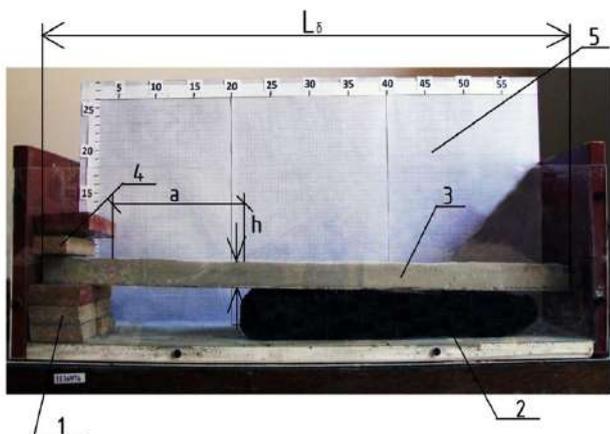


Рис. 1 – Общий вид стенда из эквивалентных материалов для изучения изгибных деформаций пород кровли при обрушении породного блока: 1 – угольный пласт; 2 – закладочный массив; 3 – балка из песчано-цементной смеси; 4 – жесткое защемление; 5 – стенд с координатными сетками;  $L_6$  – длина балки, м;  $a$  – ширина призабойного пространства, м;  $h$  – толщина балки, м

Изгибные деформации пород кровли угольного пласта определяют устойчивость балки, а безразмерная величина  $y$ , в рассматриваемой системе, является ее прочностной характеристикой и зависит от основных параметров, т.е.

$$y = f(h, B, L_6, G, F, E). \quad (1)$$

Используя  $\pi$ -теорему [17] и значимость каждого из перечисленных в (1) параметров, когда в качестве независимых размерностей выбраны (н) и (м), параметрическое уравнение в безразмерном виде приобретает вид

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

из которого следует, что в рассматриваемой модели, определяющим является линейный масштаб. Остальные масштабы вычислялись через линейный масштаб на основе известных физических закономерностей [23,24,25].

При изготовлении и испытании моделей все критерии подобия были выбраны с учетом рекомендаций [25]. Масштаб моделирования соответствовал 1:100. Всего было отработано 80 моделей с различными вариантами жесткости закладочного массива (табл.1).

Число наблюдений  $n$ , необходимых для получения достаточно надежных и достоверных результатов, с показателем точности  $\varepsilon = 5\%$ , было установлено в соответствии с [21], по выражению

$$n = \frac{V_c^2 t_{cm}^2}{\varepsilon^2}, \quad (3)$$

где  $V_c$  – коэффициент вариации, используется для определения однородности балки по прочности,  $V_c = 80\%$ ;  $t_{cm}$  – критерий Стьюдента,  $t=1,96$ .

и соответствовало  $n \approx 10$ .

Таблица 1 – Гранулометрический состав закладочного материала для податливой опоры

Вариант	Размер частиц, мм				
	4,0	3,0	2,0	1,0	<1,0
Базовый	17%	21%	24%	19%	19%
№1	100%	-	-	-	-
№2	50%	-	-	-	50%
№3	30%	-	30%	-	40%
№4	50%	50%	-	-	-
№5	-	50%	50%	-	-
№6	-	-	40%	40%	20%
№7	-	-	-	-	100%

Для определения гранулометрического состава используемой в моделях разрыхленной горной породы, использовали ситовой метод [21,22], позволяющий определить содержание фракций диаметром более 0,1мм. Закладочный массив был представлен разрыхленной породой с частицами различных размеров. Гранулометрический состав такого закладочного материала, который приняли за базовый вариант податливой опоры, представлен в табл.1.

Податливая опора, состоящая из разрыхленной горной породы, характеризуется насыпной массой  $\rho_n$ , (кг/м<sup>3</sup>) и пустотностью  $M$ , (%). Эти параметры были определены в соответствии с [27, 28].

В табл.2 представлены экспериментальные данные насыпной массы  $\rho_n$ , (кг/м<sup>3</sup>) разрыхленной горной породы, используемой для податливой опоры в моделях. Из полученных данных (табл.2) видно, что разница между максимальным и минимальным значениями  $\rho_n$ , (кг/м<sup>3</sup>) составляет 16%.

Таблица 2 – Данные экспериментальных исследований определения насыпной массы  $\rho_n$ , (кг/м<sup>3</sup>) разрыхленной горной породы, используемой для закладочного массива – податливой опоры в моделях

Значение	Варианты моделирования							
	Базовый	1	2	3	4	5	6	7
$\rho_n$ , (кг/м <sup>3</sup> )	1845	1678	1752	1745	1870	1875	1882	1988

На рис.2 представлена зависимость, отражающая изменение пустотности  $M$ , (%) закладочного материала от величины его насыпной массы  $\rho_n$ , (кг/м<sup>3</sup>).

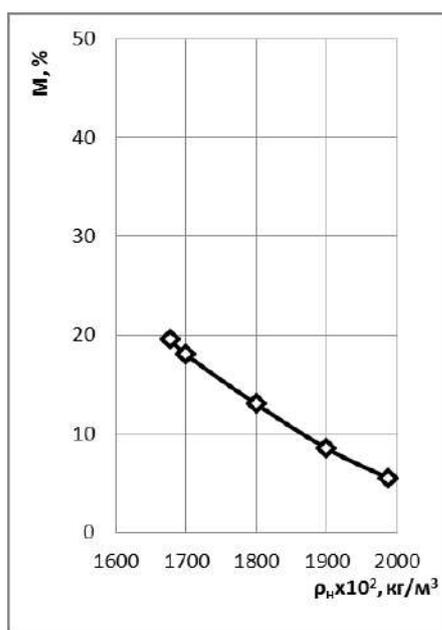


Рис. 2 – Изменение пустотности закладочного материала  $M$ , (%) от величины его насыпной массы  $\rho_n$ , (кг/м<sup>3</sup>)

Из приведенной зависимости видно, что насыпная масса  $\rho_n$ , (кг/м<sup>3</sup>) разрыхленной горной породы, увеличивается по мере уменьшения ее пустотности  $M$ , (%) (рис.2). Чем меньше размеры частиц породы и чем больше их в общей массе закладочного материала, тем больше жесткость податливой опоры. Очевидно, увеличение насыпной массы происходит за счет уменьшения

доли межзерновых пустот в насыпном объеме закладочного материала, что способствует изменению жесткости податливой опоры. Тем не менее, при проведении экспериментов учитывались результаты проведенных ранее исследований изучения пустотности песка [29]. Тогда было установлено, что пустотность материала, размер зерен которого  $d < 0,1$ мм, растет за счет тонкого воздушного сольватного слоя, окружающего зерна. Такой подход определил выбор гранулометрического состава закладочного массива для определения его жесткости  $C$ , (Н/м) и диссипативных свойств при испытании моделей (табл.1).

На рис.3 представлены зависимости, отражающие изменение пустотности закладочного массива  $M$ , (%) и величины насыпной массы  $\rho_n$ , (кг/м<sup>3</sup>) разрыхленной горной породы от жесткости  $C$ , (Н/м) податливой опоры.

При проведении экспериментальных исследований было установлено, что гранулометрический состав закладочного массива влияет на пустотность  $M$ , (%) и жесткость  $C$ , (Н/м) податливой опоры. Так, наличие 100% в закладочном массиве зерен с размерами частиц  $d < 1,0$ мм, обеспечивает жесткость податливой опоры  $C=15695$  Н/м при пустотности массива  $M=6\%$ . Величина насыпной массы при этом соответствует  $\rho_n=1988$  кг/м<sup>3</sup> (рис.3).

Добавка 20% мелких фракций  $d < 1,0$ мм и 40% фракций  $d=1,0$ мм к 40% фракций  $d=2,0$ мм обеспечивает минимальную жесткость податливой опоры  $C=3018$  Н/м при ее пустотности  $M=10\%$ . Наличие в податливой опоре 100% частиц, размер которых  $d=4,0$ мм обеспечивает ее максимальную пустотность  $M=20\%$  при жесткости  $C=7818$  Н/м и насыпной массе  $\rho_n=1678$  кг/м<sup>3</sup> (рис.3).

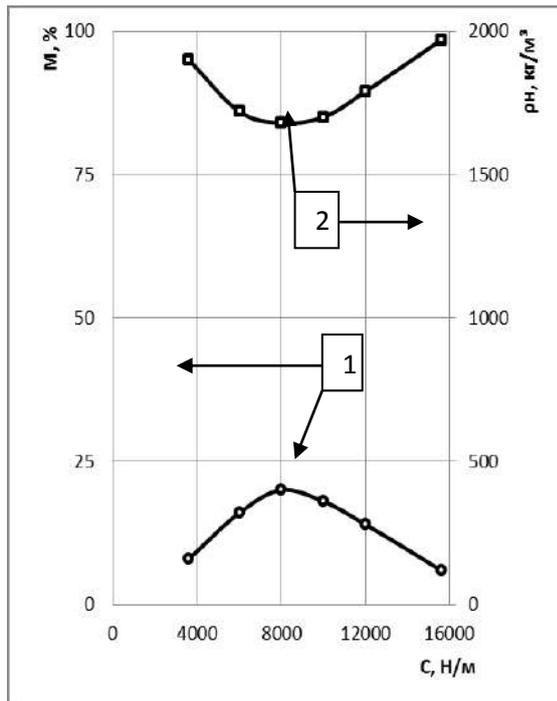


Рис. 3 – Изменение пустотности закладочного массива  $M$ , (%) и величины насыпной массы  $\rho_n$ , (кг/м<sup>3</sup>) разрыхленной горной породы от жесткости  $C$ , (Н/м) податливой опоры: 1 –  $M$ , %; 2 –  $\rho_n$ , (кг/м<sup>3</sup>)

Очевидно, это происходит в результате изменения коэффициента внутреннего трения между частицами разрыхленной горной породы в закладочном массиве при различном гранулометрическом составе.

Известно [5,7,24], что задача об ударе тела о шероховатую поверхность при контакте падающего тела с этой поверхностью, имеет решение в пределах теории удара Ньютона. В этом случае необходимо корректно определить величину ударного импульса реакции поверхности удара. Величину такого импульса для рассматриваемой системы, предлагается определять по выражению [7]

$$S = \frac{m_{\delta} \cdot m}{m_{\delta} + m} \cdot V, \quad (4)$$

где  $V$  – скорость падения породного блока, м/с; когда с увеличением массы  $m$ , (кг) падающего блока на балку, масса которой  $m_{\delta}$ , (кг) величина ударного импульса  $S$ ,  $\left(\frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}\right)$  увеличивается.

Особенностью ударных нагрузок является то, что при их действии, рассматриваемая система переходит в состояние движения. По этой причине, исследуя ударное воздействие на моделируемую породную балку, с высоты  $h=0,3\text{м}$  на модель

одноразово сбрасывали груз массой  $m$ , (кг), в результате чего балка испытывала перемещения и изгибные деформации. Масса падающего груза изменялась и соответствовала  $m=0,192\text{кг}$ ,  $m=0,55\text{кг}$ ,  $m=0,63\text{кг}$ ,  $m=0,92\text{кг}$ ,  $m=1,37\text{кг}$ . Эти перемещения и деформации регистрировались цифровой фотокамерой по фотографическим изображениям с помощью пиксельных координат точек. При этом, с использованием основных принципов фотограмметрии [30], определялись форма, размеры и положение исследуемой модели в пространстве.

Следует отметить, что при испытании моделей, в результате увеличения массы  $m$ , (кг) падающего груза, материал балки испытывал изгибные деформации, когда  $m \leq 0,55\text{кг}$  (рис.4а) или значительные необратимые деформации и разрушался при  $m \geq 0,63\text{кг}$  (рис.4б). Исходя из этого, научный и практический интерес представляли исследования изгибных колебаний балки массой  $m_{\delta}=1,37\text{кг}$ , когда на нее падал породный блок массой  $m=0,55\text{кг}$ . При этом фиксировался неупругий удар, в процессе которого при соударении твердых тел, имели место изгибные деформации без нарушения целостности балки.

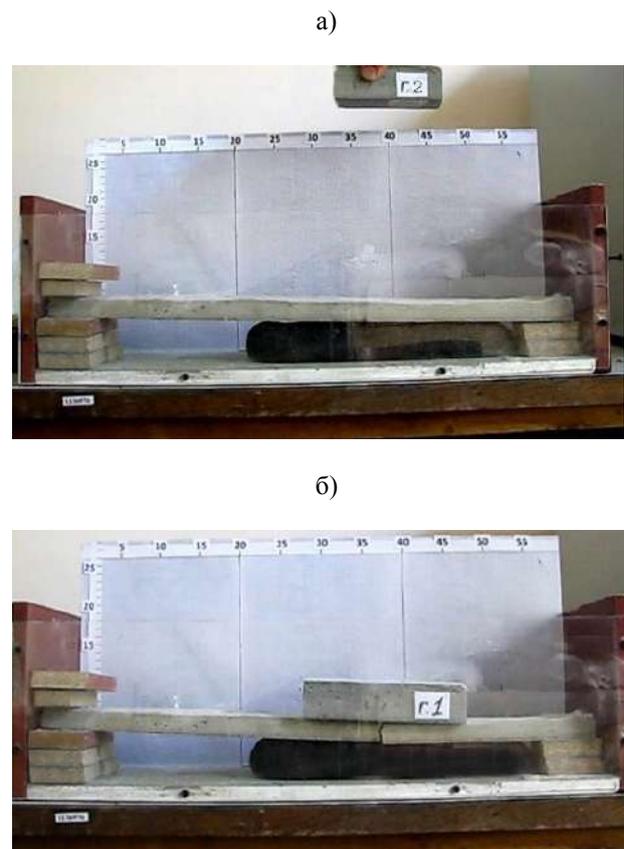


Рис. 4 – Характер взаимодействия на моделях из эквивалентных материалов падающего породного блока различной массы  $m$ , (кг) с балкой на податливой опоре жесткостью  $C=15695\text{ Н/м}$ ; а)  $m=0,55\text{кг}$ ; б)  $m=0,92\text{кг}$

При испытании моделей, в результате действия внешней силы, нами экспериментально была установлена величина прогиба балки  $x_0$ , (м), которая опиралась на закладочный массив – податливую опору различной жесткости  $C$ , (Н/м). Экспериментальные данные по вариантам моделирования представлены в табл.3.

С учетом коэффициента восстановления при ударе, когда  $k_v=0$ , по экспериментальным данным

была получена зависимость, отражающая изменение величины смещений балки  $x_0$ , (м) от жесткости  $C$ , (Н/м) податливой опоры (рис.5).

Из приведенной зависимости видно, что при неупругом ударе с увеличением жесткости закладочного массива с  $C=3018$  Н/м до  $C=15695$  Н/м, смещения балки уменьшаются в 5,2 раза (рис.5).

Таблица 3 – Экспериментальные данные, полученные в результате падения груза массой  $m=0,55$ кг на консольную балку при испытании моделей

Установленные параметры	Ед. изм.	Варианты моделирования							
		Базовый	1	2	3	4	5	6	7
Смещение балки при ударе, $x_0$	м	0,0042	0,0025	0,0037	0,0036	0,005	0,0058	0,0065	0,00125
Жесткость закладочного массива, $C$	Н/м	4671	7848	5303	5450	3924	3383	3018	15695

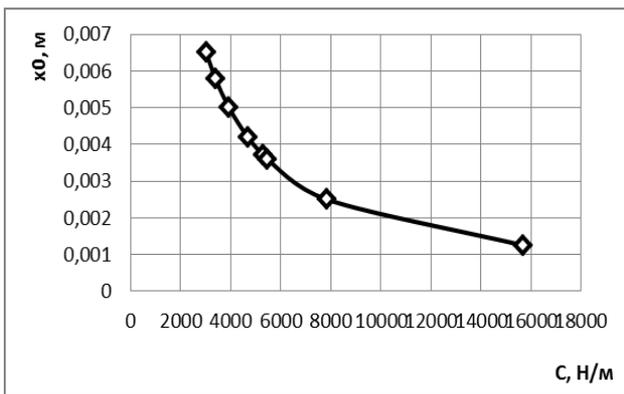


Рис. 5 – Зависимость величины смещений балки  $x_0$ , (м) опирающейся на закладочный массив различной жесткости  $C$ , (Н/м) при падении на нее породного блока массой  $m=0,55$ кг

При решении задачи о действии динамических нагрузок на систему с податливой опорой, возникает необходимость в определении не только перемещений балки и самой податливой опоры, но и определении амплитуды и частоты собственных колебаний моделируемой системы.

Амплитуда собственных колебаний системы, в таких случаях, определяется как в [8] по выражению

$$A = \sqrt{x_0^2 + \frac{v_0^2}{k^2}}, \quad (5)$$

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

и зависит от величины смещения балки  $x_0$ , (м), скорости падения породного блока  $v_0 = \sqrt{2gh}$  и частоты колебаний  $k$ , (1/с).

Нами установлено, что в случае неупругого удара, когда  $k_v=0$ , с увеличением жесткости закладочного массива  $C$ , (Н/м), круговая частота колебаний балки  $k$ , (1/с) увеличивается (рис.6,а), а амплитуда колебаний  $A$ , (м) – уменьшается (рис.6,б). В случае уменьшения величины  $k$ , (1/с) перемещения защищаемого объекта стали больше, т.е. больше величина прогиба балки  $x_0$ , (м).

Физический процесс собственных колебаний системы характеризуется ее добротностью  $D$ , величина которой определяется по выражению [8,31]

$$D = \pi N_e,$$

где  $N_e$  - число полных колебаний, совершаемых системой за время, в течение которого продолжаются собственные колебания.

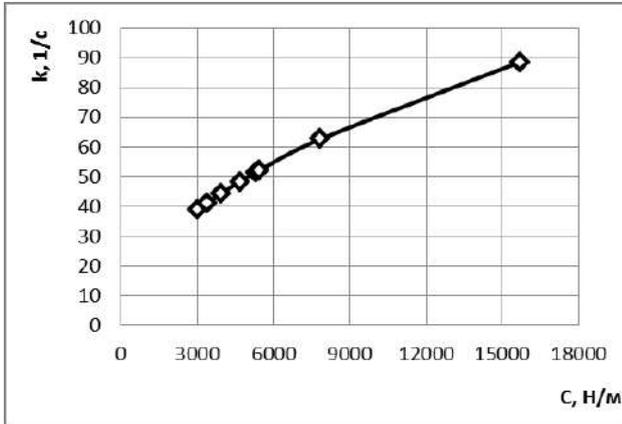
На рис.7 приведена зависимость отражающая изменение величины добротности системы  $D$  от жесткости закладочного массива  $C$ , (Н/м), из которой видно, что с увеличением  $C$ , (Н/м) в 5,2 раза, величина  $D$  увеличивается в 2,5 раза. Чем больше добротность колебательной системы  $D$ , тем чувствительнее она к воздействию внешней силы и тем больше вероятность появления бифуркации.

Добротность, равная или меньше 0,5 соответствует неколебательному движению, а при  $D < 100$  система, с точки зрения изучения колебаний, считается неэффективной [8,32,33].

Модель удара Ньютона не позволяет определить такой важный параметр удара при

обрушении породного блока на балку, как продолжительность контакта между соударяющимися телами.

а)



б)

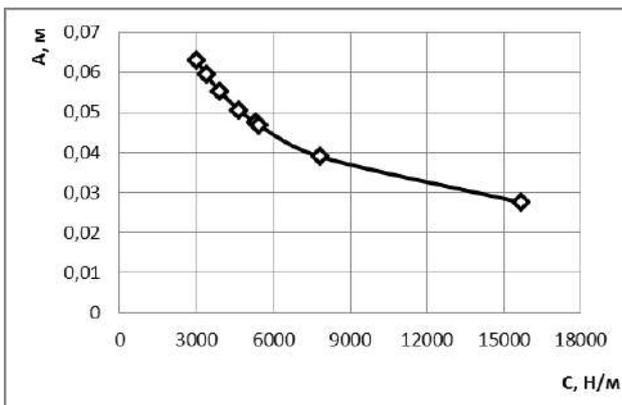


Рис. 6 – Зависимость а) круговой частоты  $k$ , (1/с) и б) амплитуды  $A$ , (м) колебаний балки от жесткости закладочного массива  $C$ , (Н/м)

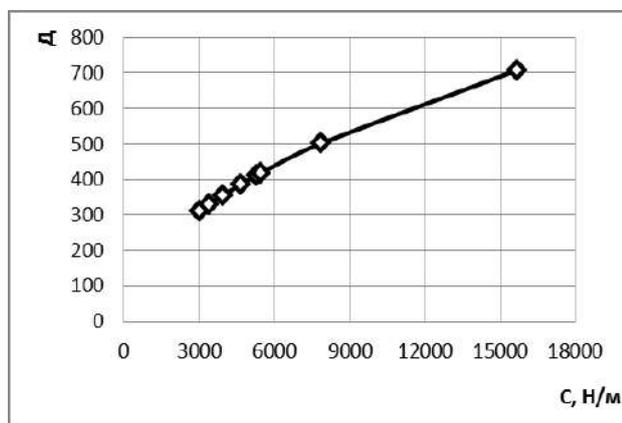


Рис. 7 – Зависимость добротности  $D$  рассматриваемой системы от жесткости закладочного массива  $C$ , (Н/м)

Тем не менее, промежуток времени  $t_{y\delta}$ , (с), между моментом приложения действующей силы и достижением максимального прогиба балки в рассматриваемой системе, можно определить по выражению [6]

$$t_{y\delta} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{x_0}{g}}$$

На рис.8а,б представлены экспериментальные зависимости, отражающие изменение промежутка времени  $t_{y\delta}$ , (с), между моментом приложения внешней силы и достижением максимального прогиба балки  $x_0$ , (м) с учетом амплитуды колебаний  $A$ , (м) и жесткости закладочного массива  $C$ , (Н/м).

Установлено, что с увеличением жесткости закладочного массива  $C$ , (Н/м) промежуток времени  $t_{y\delta}$ , (с), уменьшается (рис.8а). Однако, при увеличении  $t_{y\delta}$ , (с), амплитуда колебаний  $A$ , (м) растет (рис.8б), а это значит, что наличие податливого основания, с минимальным значением жесткости, способствует смягчению удара.

Известно [34], что в колеблющихся системах при колебаниях, кроме восстанавливающих сил, проявляются силы трения. Последние, совершают необратимую работу, что приводит к диссипации механической энергии, т.е. способности закладочного массива максимально поглощать энергию деформирования.

В качестве количественного показателя оценки демпфирующей способности рассматриваемой системы, предлагается использовать коэффициент диссипации  $\psi$ , который определяется по выражению, как в [35]

$$\psi = \frac{W}{E_p}, \quad (7)$$

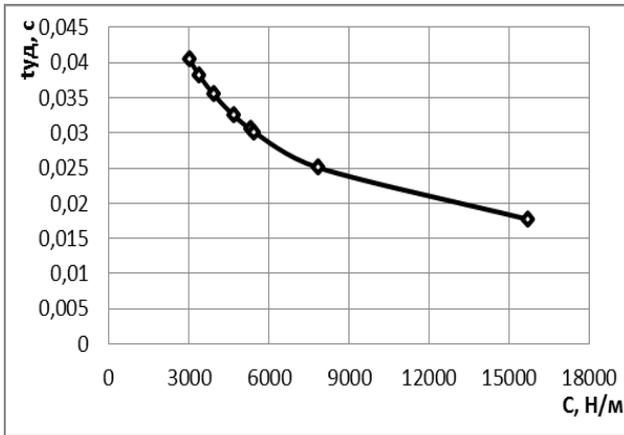
где  $W$  - рассеянная за цикл колебания энергия, Дж;  $E_p$  - потенциальная энергия системы, Дж.

На рис.9 представлена зависимость, отражающая изменение коэффициента диссипации  $\psi$  от жесткости закладочного массива  $C$ , (Н/м).

Установлено, что минимальные значения исследуемой нами величины, отмечены при максимальной жесткости  $C$ , (Н/м) закладочного массива, когда доля межзерновых пустот в насыпном объеме разрыхленного материала минимальная (рис.9). Очевидно, причиной уменьшения значений коэффициента  $\psi$  являются силы, обусловленные внутренним трением в закладочном массиве, когда более мелкая (менее 1,0 мм) и однородная порода, лучше проявляет

демпфирующие свойства опоры. Из этого следует, что значения этого коэффициента зависят от гранулометрического состава закладочного материала.

а)



б)

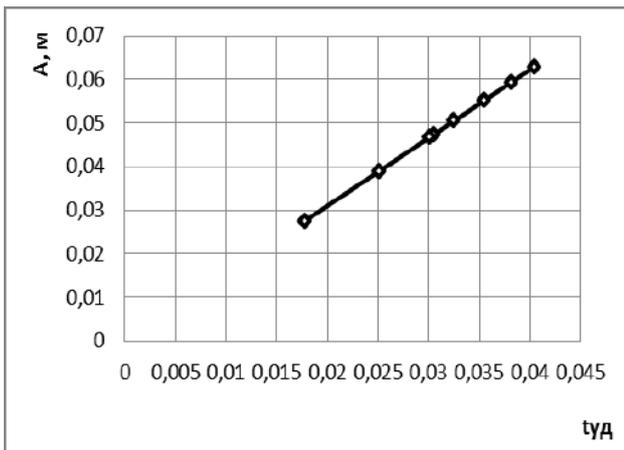


Рис. 8 – Зависимость а) промежутка времени  $t$ , (с) между моментом приложения действующей силы и достижением максимального прогиба балки от жесткости закладочного массива  $C$ , (Н/м) и б) амплитуды колебания системы  $A$ , (м) от промежутка времени  $t$ , (с)

Демпфирующая способность закладочного массива приводит к ослаблению собственных колебаний системы, т.е. существенному уменьшению амплитуды и, соответственно, сглаживанию напряжений в зоне их концентрации, т.е. в месте соударения породного блока с балкой, но при определенных значениях жесткости  $C$ , (Н/м).

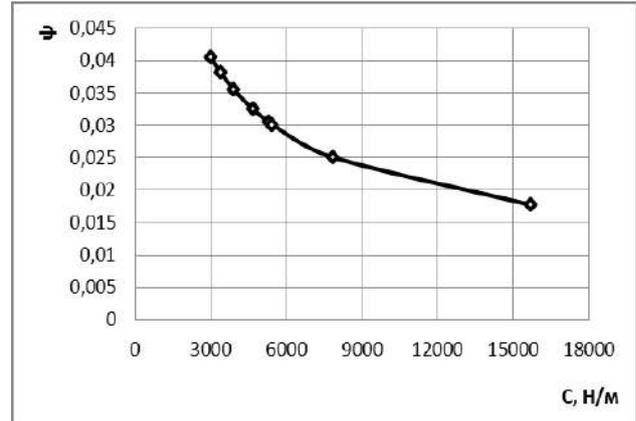


Рис. 9 – Зависимость коэффициента диссипации  $\psi$  от жесткости закладочного массива  $C$ , (Н/м)

При решении динамических задач, часто используется параметр – коэффициент неупругого сопротивления  $\gamma$ , который представляет собой отношение амплитуды неупругой деформации к величине упругой деформации [11] и определяется по выражению

$$\gamma = \frac{\psi}{2\pi}. \quad (8)$$

Нами установлено, что с увеличением жесткости закладочного массива  $C$ , (Н/м), значения коэффициента неупругого сопротивления  $\gamma$  уменьшаются, т.е. при минимальных его значениях демпфирующие свойства податливой опоры улучшаются.

Физической величиной, определяющей характер колебаний при демпфировании, является коэффициент демпфирования, определяемый как в [36,37]

$$\xi = \frac{r}{2mk}, \quad (9)$$

где  $r$  - коэффициент силы сопротивления движения,  $r=0,3-0,5$  кг/с;  $m$  – масса системы, кг.

На рис.10а,б представлены зависимости, отражающие изменение коэффициента демпфирования  $\xi$  от жесткости закладочного массива  $C$ , (Н/м) и числа заметных колебаний  $n$  в рассматриваемой системе.

Из рисунка 10а видно, что с увеличением жесткости опоры  $C$ , (Н/м), коэффициент демпфирования  $\xi$  уменьшается. Во всех случаях, связанных с изменением жесткости податливой опоры, его значение существенно меньше  $\xi < 1$ , что свидетельствует о плавном затухании колебаний в рассматриваемой системе. При испытании моделей и

таких значениях коэффициента, колебания массы продолжались с уменьшающейся амплитудой до их полного прекращения. Отмечено, что с увеличением жесткости опоры  $C$ , (Н/м), в 5,2 раза увеличивалось количество колебаний в единицу времени  $\nu$ , (с) и в 2,3 раза число  $n$  заметных колебаний (рис.10б).

Так, при испытании моделей, при увеличении жесткости опоры, когда уменьшается  $\xi$  за время существования заметных колебаний  $t_k=37,17$ с, их число изменялось от  $n=230$  до  $n=529$ . Следовательно, чем меньше значение коэффициента  $\xi$ , тем дольше длятся колебания рассматриваемой системы.

Важным показателем демпфирующих свойств закладочного массива является коэффициент потерь  $\eta$ , величина которого зависит от логарифмического декремента затухания колебаний  $\delta$  и определяется согласно [11], по выражению

$$\eta = \frac{2\delta}{\sqrt{4\pi^2 + \delta^2}}. \quad (10)$$

На рис.11а,б представлены зависимости, отражающие изменение коэффициента потерь, с учетом добротности рассматриваемой системы и промежутка времени, между ударом породного блока о балку и достижением ее максимального прогиба.

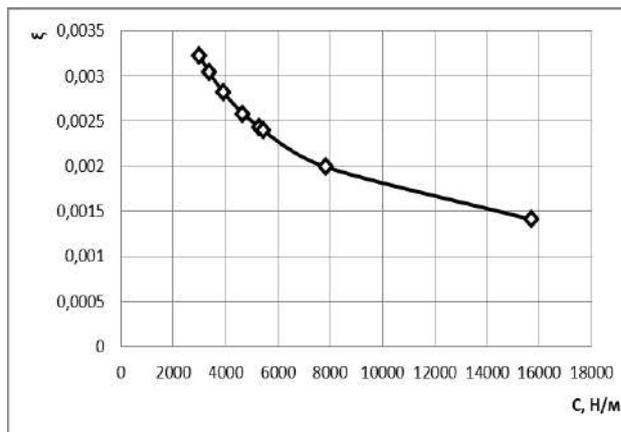
Установлено, что потери энергии в системе будут минимальными в том случае, когда балка опирается на жесткий массив, т.е. при  $C=15969$  Н/м. Для данных условий добротность системы принимает максимальные значения  $D=708$  (рис.11а). Максимальное значение  $\eta=0,0067$  отмечено нами при испытании моделей, когда податливая опора имела жесткость  $C=3018$  Н/м. При такой жесткости, промежуток времени, между ударом породного блока о балку и достижением ее максимального прогиба, составляет  $t_{уд}=0,04$ с, т.е. для рассмотренных вариантов моделирования является максимальным (рис.11б). Очевидно, чем больше значение  $t_{уд}$ , (с), тем больше прогиб балки, а, следовательно, система способствует смягчению действия внешней силы (удара).

Движение рассмотренной нами системы в результате испытания моделей происходило с начальной колебательной скоростью  $\nu=2,43$ м/с при относительно малой силе сопротивления, которой соответствовал коэффициент затухания колебаний  $\beta < k$ .

Уравнение движения системы, с учетом затухания колебаний во времени  $t=37,17$ с, согласно [8] имеет вид

$$x = Ae^{-\beta t}. \quad (11)$$

а)



б)

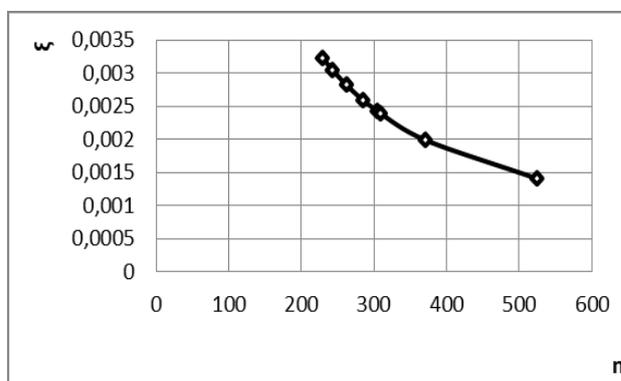


Рис. 10 – Зависимость коэффициента демпирования  $\xi$  от жесткости закладочного массива  $C$ , (Н/м) (а) и числа  $n$  заметных колебаний (б) в рассматриваемой системе

Графически это выражение можно представить в виде зависимостей, изображенных на рис.12, с учетом минимальной  $C=3018$ Н/м (зависимость 1) и максимальной  $C=15695$ Н/м (зависимость 2) жесткости закладочного массив. Во всех рассматриваемых случаях зависимость амплитуды колебаний балки от координаты имеет вид убывающей функции.

В случае, когда  $x \leq \Delta x$ , система попадает в застойную зону и движение прекращается. Величину этой зоны, которая обозначается  $\Delta x$ , (м), в которой реакция податливой опоры равна максимальной силе сопротивления, можно определить по выражению [38]

$$\Delta x = \frac{f \cdot Q}{C},$$

где  $f$  – коэффициент сцепления между частицами;

Это отрезок, удаленный от оси  $O_t$  на определяемую величину  $\Delta x$ , (м).

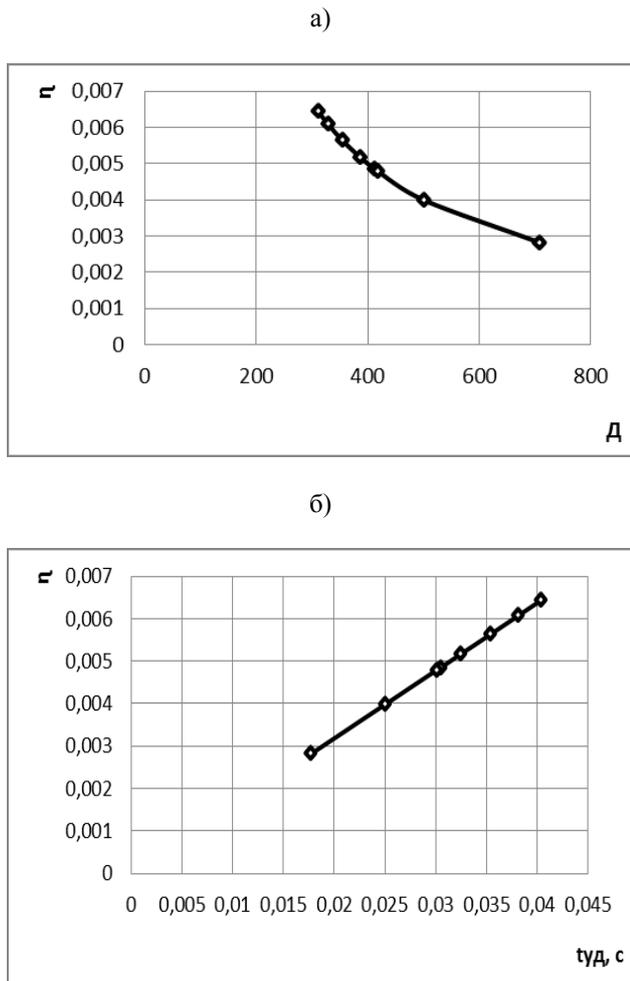


Рис. 11 – Зависимость величины коэффициента потерь  $\eta$  от добротности  $D$  рассматриваемой системы (а) и промежутка времени  $t$ , (с) между моментом обрушения породного блока и достижением максимального прогиба балки (б)

Из приведенной зависимости видно, чем больше жесткость закладочного массива, тем меньше размеры зоны застоя, а значит больше число заметных колебаний в системе.

Таким образом, система, состоящая из консольной породной балки, которая имеет основание в виде податливой опоры, т.е. закладочный массив и возбужденная начальным толчком при падении на балку породного блока, а затем представленная самой себе, совершает затухающие колебания с частотой, зависящей от жесткости податливой опоры и массы системы. Геометрический параметр  $x_0$ , (м), характеризующий перемещение балки в рассматриваемой системе, определяет ее напряженно-деформированное состояние. При изменении величины этого параметра во времени, вместе с ним изменяются напряжения и деформации. Спротивляемость системы этим перемещениям оказывает жесткость опоры  $C$ , (Н/м), на которую опирается породная балка.

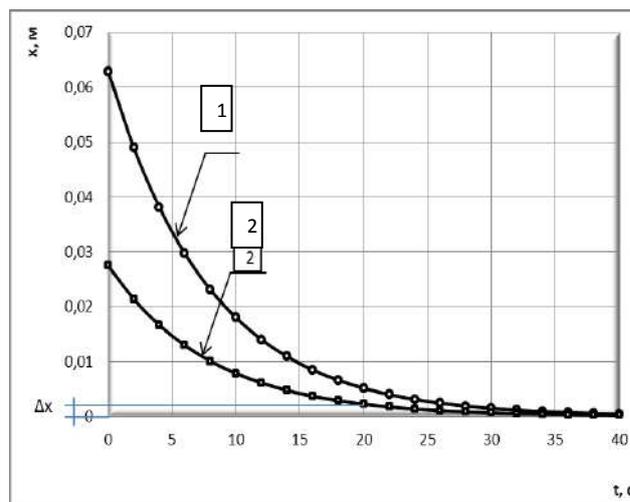


Рис. 12 – Зависимость координаты точки тела  $x$ , (м) для консольной балки длиной  $L=0,6$ м, опирающуюся на закладочный массив различной жесткости  $C$ , (Н/м) при падении породного блока  $t=0,55$ с:  $\beta=0,12$ ; 1 –  $C=3018$  Н/м; 2 –  $C=15695$ Н/м,  $\Delta x$  – размер зоны застоя, м

Эффект ударного воздействия в значительной мере зависит от жесткости основания в рассматриваемой системе и чем она жестче, тем система чувствительнее реагирует на ударные нагрузки и более склонна к разрушению. Максимальная амплитуда колебаний в такой системе, соответствует минимальному значению жесткости закладочного массива, когда насыпная плотность уменьшается, что способствует смягчению удара при падении породного блока.

Диссипативные свойства закладочного массива определяются его гранулометрическим составом и пустотностью, и отражают способность податливой опоры поглощать колебания, вызванные воздействием внешней силы на балку. Это происходит за счет сил внутреннего трения, возникающих в податливой опоре и балке в результате преобразования механической энергии в энергию деформирования или разрушения. Рассматривая закладочный массив как демпфер, при испытании моделей было установлено, что более жесткое основание, пустотность которого менее 6%, при максимальной насыпной плотности ухудшает, а не улучшает условия работы рассматриваемой системы, особенно с точки зрения устойчивости боковых пород при действии на них ударных нагрузок. С увеличением жесткости податливой опоры, рассматриваемая система максимально поглощает энергию деформирования.

## Выводы

При изучении изгибных деформаций пород кровли разрабатываемого угольного пласта при способе управления горным давлением в очистном забое закладкой выработанного пространства, обеспечивается ее устойчивое состояние за счет демпфирующей способности податливой опоры, поддерживающей породы кровли позади очистной выработки. Демпфирующая способность закладочного массива играет огромную роль в поведении пород кровли при внезапных обрушениях расслоившейся толщи и посадках основной кровли. Наличие такой способности способствует ослаблению колебаний и сглаживанию напряжений в боковых породах. Для нейтрализации ударных нагрузок к закладочному массиву предъявляются определенные требования, среди которых величина усадки, зависящая от его гранулометрического состава. Гранулометрический состав закладочного массива, его насыпная плотность, определяют диссипативные свойства податливой опоры, обеспечивая при этом устойчивость рассматриваемой системы. Использование податливых опор для поддержания боковых пород позволит сохранить горные выработки в эксплуатационном состоянии весь период их службы, уменьшить вероятность травматизма от обвалов и обрушений расслоившейся породной толщи и сохранить ее сплошность.

## Список литературы

1. Андрушко, В. Ф. Управление кровлей в сложных горно-геологических условиях / В. Ф. Андрушко, С. А. Саракитянец, Ю. Г. Спицын – К.: Техника, 1985. – 372 с.
2. Викторов, С. Д. Сдвигение и разрушение горных пород / С. Д. Викторов, М. А. Иофис, С. А. Гончаров. – М.: Наука, 2005. – 277 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. Жуков, В. Е. Малоотходная технология добычи угля / В. Е. Жуков, В. В. Выстороп, А. М. Колчин и др. – К.: Техника, 1984. – 144 с.
5. Лапшин, В. В. Удар о поверхность тела с дополнительной опорой / В. В. Лапшин // *Вестник Московского гос.техн.ун-та им Н.Э. Баумана. Серия: Естественные науки*. – 2006. – С. 45-53.
6. Кильчевский, Н. А. Динамическое контактное сжатие твердых тел. Удар / Н. А. Кильчевский. – К.: Наукова думка, 1976. – 311 с.
7. Тригуб, А. М. Приближенные способы оценки коэффициента восстановления при соударении твердых тел / А. М. Тригуб, Е. В. Штагер // *Современные наукоемкие технологии*. – 2014. - №5. – 1. – С. 91-93.
8. Стрелков, С. П. Введение в теорию колебаний / С. П. Стрелков. – СПб.: Изд-во «Лань», 2005. – 440 с.
9. Meirovitch, L. Fundamentals of Vibrations. Mc Graw-Hill / L. Meirovitch. – 2001. – 806 p.
10. Baddour, N. Recent Advances in Vibration Analysis / N. Baddour. - In Tech., Rijeka, Croatia, 2011. – 236 p.
11. 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.
12. Нашиф, А. Демпфирование колебаний / А. Нашиф, Д. Джоунс, Дж. Хендерсон. – М.: Мир, 1988. – 448 с.
13. (Ed.) Advances in Vibration Analysis Research. – In Tech. / F. Ebrahimi. – 2011. – 456 p.
14. Agarwal, R. P. Discrete Oscillation Theory / R. P. Agarwal, M. Bohner, S. R Grace, D. O'Regan. – Hindwai Publishing Corporation, 2005. – 961 p.
15. Мелешко, В. В. Изгибные колебания упругих прямоугольных пластин со свободными краями: от Хладни (1809) и Ритца (1909) до наших дней / В. В. Мелешко, С. О. Попков // *Акустический вестник*. – 2009. – №4, т.12. – с. 34-51.
16. 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.
17. Назаров, А. Г. О механическом подобии твердых деформируемых тел / А. Г. Назаров. – Ереван, Изд-во АН Арм.ССР, 1965. – 218 с.
18. Борщ-Компониц, В. И. Практическая механика горных пород / В. И. Борщ-Компониц. – М.: Изд-во «Горная книга», 2013. – 322 с.
19. Зубков, А. А. Определение прочности бетона / А. А. Зубков. – М.: Изд-во АСВ, 1998 – 120 с.
20. 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.
21. Подкопаев, С. В. Лабораторный практикум по курсу «Механика горных пород» / С. В. Подкопаев, Н. Н. Гавриш, Б. М. Деглин, В. И. Каменец. – Донецк: ДонНТУ, 2012. – 48 с.
22. Порцевский, А. К. Основы физики горных пород, геомеханики и управления состоянием массива / А. К. Порцевский, Г. А. Катков. – М.: Моск.гос. открытый ун-т, 2004. – 120 с.
23. Шенк, Х. Теория Инженерного эксперимента / Х. Шенк. – М.: Мир, 1972. – 382 с.
24. Чепига, Д. А. О внезапных обрушениях боковых пород при эксплуатации горных выработок / Д. А. Чепига, И. В. Иорданов, А. Э. Кипко и др. // *World Science*. – 2017. - №3(19). Vol.1. – p. 33-37.
25. Бриджмен, П. В. Анализ размерностей / П. В. Бриджмен. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 148 с.
26. Кутателадзе, С. С. Анализ подобия и физические модели / С. С. Кутателадзе. – Новосибирск, Наука, 1982. – 304 с.
27. Механіка гірських порід / Під заг.ред. С. С. Гребьонкіна, М. М. Гавриша. – Донецьк: ДонНТУ, 2004. – 169 с.
28. Ильницкая, Е. И. Свойства горных пород и методы их определения / Е. И. Ильницкая. – М.; Недра, 1969. – 392 с.

29. **Коробкин, В. И.** Инженерная геология и охрана окружающей среды / **В. И. Коробкин, Л. В. Передельский.** – Ростов-на-Дону: Изд-во Рос. ун-та, 2013. – 348 с.
30. **Обиралов, А. И.** Фотограмметрия / **А. И. Обиралов, А. Н. Лимонов, Н. А. Гаврилова.** – М.: Колос С, 2004. – 240 с.
31. **Vibration and Shok Handbook.**L.; Hutchinson, 2000. – 240 p.
32. **Bottega, W. J.** Engineering Vibrations / **W. J. Bottega.** – CRC Press, Taylor&Francis Group, 2006. – 727 p.
33. **Butikov, E. I.** Physic of Oscillation. Useris Manual. American Institute of Physics, Physics Academic Software / **E. I. Butikov.** – New York, 1996. – 120 p.
34. **Ginsberg, I.** Engineering Dynamics. Cambridge University Press / **I. Ginsberg.** – 2008. – 726 p.
35. **Палочкин, С. В.** Экспериментальные исследования демпфирования колебаний в текстильных паковках с крестовой намоткой нити / **С. В. Палочкин, Н. Ю. Лабай, П. Н. Рудовский // Технология текстильной промышленности.** – 2015. – №3 (357). – С. 141-145.
36. **Баженов, В. А.** Численные исследования динамических процессов в виброударных системах при моделировании удара силой контактного взаимодействия / **В. А. Баженов, О. С. Погорелова, Т. Г. Постникова и др. // Проблемы прочности.** – 2008. – №6. – С. 82-90.
37. **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.
38. **Яблонский, С. А.** Курс теории колебаний / **С. А. Яблонский, С. С. Нореико.** – М.: Изд-во ВВУ, 2007. – 336 с.
7. **Trigub, A. M., Shtager, E. V.** Priblizhennyye sposoby ocenki koefficienta vosstanovleniya pri soudarenii tverdyh tel [Approximate methods for estimating the recovery coefficient for a collision of solids]. *Sovremennyye naukoemkie tehnologii*, 2014, 5(1), 91-93.
8. **Strelkov, S. P.** Vvedenie v teoriyu kolebanij [Introduction to the theory of oscillations]. - SPb.: Izd-vo «Lan», 2005, 440.
9. **Meirovitch, L.** Fundamentals of Vibrations. Mc Graw-Hill, 2001, 806.
10. **Baddour, N.** Recent Advances in Vibration Analisic. - In Tech., Rijeka, Croatia, 2011, 236.
11. **Shakirzjanov, R. A., Shakirzjanov, F. R.** Dinamika i ustojchivost' sooruzhenij [Dynamics and stability of structures]. Kazan': Izd-vo Kazans. gos. arhit-str. un-ta, 2005, 120.
12. **Nashif, A., Dzhouns, D., Henderson, Dzh.** Dempfirovanie kolebanij [Oscillation damping]. M.: Mir, 1988, 448.
13. **Ebrahimi, F.** Advances in Vibration Analisic Research. - In Tech, 2011, 456.
14. **Agarwal, R. P., Bohner, M., Grace, S. R., O'Regan, D.** Discrete Oscillation Theory. Hindwai Publishing Corporation, 2005, 961.
15. **Meleshko, V. V., Popkov S. O.** Izzibnye kolebanija uprugih prjamougol'nyh plastin so svobodnymi krajami: ot Hladni (1809) i Ritca (1909) do nashih dnei [Bending oscillations of elastic rectangular plates with free edges: from Hladni (1809) and Ritz (1909) to the presen], *Akusticheskij vestnik*. 2009, 4(12), 34-51.
16. **Nacional'nij standart Ukraïni. Metodi viprobuvannya cementu. Chastina 1. Viznachennja micnosti** [The national standard of Ukraine. Methods viprobuvannya cement. Part 1. Viznachennya micnostnosti] (EN 196-1:2005, IDT) DSTU EN196-1:2007. Kiïv, Minbud Ukrïni, 2007, 30.
17. **Nazarov, A. G.** O mehanicheskom podobii tverdyh deformiruemyh tel [On the mechanical similarity of solid deformable bodies]. Erevan, Izd-vo AN Arm.SSR, 1965, 218.
18. **Borshh-Komponiec, V. I.** Prakticheskaja mehanika gornah porod [Practical mechanics of rock formations]. M.: Izd-vo «Gornaja kniga», 2013, 322.
19. **Zubkov, A. A.** Opređenje prochnosti betona [Determination of strength of concrete]. M.; Izd-vo ASV, 1998, 120.
20. **Dvorkin, L. I., Goc, V. I., Dvorkin, O. L.** Ispytanija betonov i rastvorov. Proektirovanie ih sostavov [Tests of concrete and mortar. Designing their compositions]. M.: Infra-Inzhenerija, 2015, 418.
21. **Podkopaev, S. V., Gavrish, N. N., Deglin, B. M., Kamenev, V. I.** Laboratornyj praktikum po kursu «Mehanika gornyh porod» [Laboratory workshop on the course "Mechanics of rocks"]. Doneck: DonNTU, 2012, 48.
22. **Porcevskij, A. K. Katkov, G. A.** Osnovy fiziki gornyh porod, geomehaniki i upravlenija sostojaniem massiva [Fundamentals of rock physics, geomechanics and array state management] – M.: Mosk.gos. otkrytyj un-t, 2004, 120.
23. **Shenk, H.** Teorija Inzhenerenogo jeksperimenta [Theory of Engineering experiment]. M.: Mir, 1972, 382.
24. **Chepiga, D. A., Iordanov, I. V., Kipko, A. Je.** O vnezapnyh obrushenijah bokovyh porod pri jekspluatacii gornyh vyrabotok [On the sudden collapse of lateral

## Bibliography (transliterated)

1. **Andrushko, V. F., Sarakitjanc, S. A., Spicyn, Ju. G.** Upravlenie krovlej v slozhnyh gorno-geologicheskikh uslovijah [Control of the roof in difficult mining and geological conditions]. K.: Tehnika, 1985, 372.
2. **Viktorov, S. D., Iofis, M. A., Goncharov, S. A.** Sdvizhenie i razrushenie gornyh porod [Shift and destruction of rocks]. M.: Nauka, 2005, 277.
3. **Zborshhik, M. P., Podkopaev, S. V.** Mehanizm povyshenija ustojchivosti krovli v lavah pri primenenii zakladki vyrabotannogo prostranstva [The mechanism of increasing the stability of the roof in lavas with the use of a bookmark of worked-out space]. *Ugol' Ukrainy*, 1992, 5, 20-23.
4. **Zhukov, V. E., Vystorop, V. V., Kolchin, A. M.** Maloethodnaja tehnologija dobychi uglja [Low-waste coal mining technology]. K.: Tehnika, 1984, 144.
5. **Lapshin, V. V.** Udar o poverhnost' tela s dopolnitel'noj oporoj [Impact on the surface of the body with an additional support] *Vestnik Moskovskogo gos.tehn.un-ta im N.Je. Bauman. Serija: Estestvennye nauki*, 2006, 45-53.
6. **Kil'chevskij, N. A.** Dinamicheskoe kontaktное szhatie tverdyh tel. Udar [Dynamic contact compression of solids. Strike]. K.: Naukova dumka, 1976, 311.

- rocks during the exploitation of mine workings]. *World Science*, 2017, 3(19),1, 33-37.
25. **Bridzhmen, P. V.** Analiz razmernostej [Analysis of dimensions]. Izhevsk: NIC «Reguljarnaja i haoticheskaja dinamika», 2001, 148.
26. **Kutateladze, S. S.** Analiz podobija i fizicheskie modeli [Similarity analysis and physical models]. Novosibirsk: Nauka, 1982, 304.
27. Pid zag.red. **Greb'onkina, S. S., Gavrisha. M. M.** Mehanika girs'kih porid [Mechanics of rocks]. Donec'k: DonNTU, 2004, 169.
28. **Il'nickaja, E. I.** Svojtva gornyh porod i metody ih opredelenija [Properties of rocks and methods for their determination]. M.: Nedra, 1969, 392.
29. **Korobkin, V. I., Peredel'skij, L. V.** Inzhenernaja geologija i ohrana okruzhajushhej sredy [Engineering geology and environmental protection]. Rostov-na-Donu: Izd-vo Ros. un-ta, 2013, 348.
30. **Obiralov, A. I., Limonov, A. N., Gavrilova, N. A.** Fotogrammetrija [Photogrammetry]. M.: Kolos S, 2004, 240.
31. Vibration and Shok Handbook.L.; Hutchinson, 2000, 240p.
32. **Bottega, W. J.** Engineering Vibration. CRC Press, Taylor&Francis Group, 2006, 727.
33. **Butikov, E. I.** Physic of Oscillation. Useris Manual. American Institute of Physics, Physics Academic Software. New York, 1996, 120.
34. **Ginsberg, I.** Engineering Dynamics. Cambridge University Press, 2008, 726.
35. **Palochkin, S. V., Labaj, N. Ju., Rudovskij, P. N.** Jeksperimental'nye issledovanija dempfirovanija kolebanij v tekstil'nyh pakovkah s krestovoj namotkoj niti [Experimental studies of vibration damping in textile packages with cross winding of filaments]. *Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti*, 3(357), 2015, 141-145.
36. **Bazhenov, V. A., Pogorelova, O. S., Postnikova, T. G.** i dr. Chislennye issledovanija dinamicheskikh processov v vibroudarnyh sistemah pri modelirovanii udara siloj kontaktного vzaimodejstvija [Numerical studies of dynamic processes in vibro-impact systems in the simulation of impact by the force of contact interaction]. *Problemy prochnosti*, 2008, 6, 82-90.
37. **Kovaleva, N. V., Rutman, Ju. L., Davydova, G. V.** Opredelenie optimal'nyh parametrov dempfirovanija v sistemah sejsmoizoljacji [Determination of optimal damping parameters in seismic isolation systems] *Inzhenerno-stroitel'nyj Zhurnal. Magazine of Civil Engineering*, 5, 2013, 107-115.
38. **Jablonskij, S. A., Norejko, S. S.** Kurs teorii kolebanij [Course of the theory of oscillations]. M.: Izd-vo BHV, 2007, 336.

#### Сведения об авторах (About authors)

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

**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.

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

**Volodymyr Kolomiets** – engineer, director of mine management "Yuzhnodonbasskoe №1", Ugleдар, Ukraine; e-mail: ugnodon1@gmail.com.

**Подкопаев Евгений Сергеевич** – инженер кафедры горного дела и геологии, Силезский технический университет, г.Гливице, Польша; e-mail: podkopaev\_evgeniy@mail.ru.

**Yevhen Podkopaiev** – engineer of the Department of Mining and Geology, Silesian Technical University, Gliwice, Poland; e-mail: podkopaev\_evgeniy@mail.ru.

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

**Anton Korol** – engineer, Municipal Enterprise "Mine management "Dobropolskoe", LLC "DTEK Dobropolyeugol", Dobropole, Ukraine; e-mail: akorolv2017@gmail.com.

**Довгаль Виталий Юрьевич** – инженер, Шахтоуправление «Мирноградуголь», г.Мирноград, Украина; e-mail: vud007007@gmail.com.

**Vyalyi Dovhal** – engineer, Mine management "Mirnogradugol", Mirnograd, Ukraine; e-mail: vud007007@gmail.com.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Иорданов, И. В.** О влиянии изгибных деформаций на состояние кровли угольного пласта при внезапных обрушениях породной толщи / **И. В. Иорданов, Д. А. Чепига, В. А. Коломиец, Е. С. Подкопаев, А. В. Король, В. Ю. Довгаль** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2018. – № 16 (1292). – С. 27-40. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.05.

Please cite this article as:

**Iordanov, I., Chepiga, D., Kolomiets, V., Podkopaiev, Y., Korol, A., Dovhal, V.** On the influence of bending deformations on the condition of the roof of a coal plast with extremely breaks of brown thickness. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, **16** (1292), 27-40, doi:10.20998/2413-4295.2018.16.05.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

**Иорданов, И. В.** Про вплив згибних деформацій на стан покрівлі вугільного пласта при різких обваленнях породної товщі / **И. В. Иорданов, Д. А. Чепіга, В. А. Коломієць, Є. С. Подкопась, А. В. Король, В. Ю. Довгаль** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018 – № 16 (1292). – С. 27-40. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.05.

**АНОТАЦІЯ** Експериментально встановлено, що демпфуюча здатність закладного масиву, який є піддатливою основою для покрівлі вугільного пласта при його розробці, робить істотний вплив на поведінку бічних порід в околиці гірничої виробки при раптових обваленнях розширеної товщі або посадках основної покрівлі. В результаті дії на покрівлю зовнішньої сили, при порожнистості закладного масиву  $M \leq 20\%$ , коли забезпечується його мінімальна жорсткість, амплітуда коливань розглянутої системи стає максимальною. Доведено, що при збільшенні жорсткості закладного масиву в 5 разів, коли його порожнистість зменшується, а насипна щільність збільшується, розглянута система максимально поглинає енергію деформування. В таких умовах збільшується її добротність, число фіксованих коливань і зменшується проміжок часу, між моментом докладання зовнішньої сили і досягненням максимального прогину покрівлі, а сама система стає більш чутливою до впливу такої сили і руйнування. Коефіцієнт демпфування при цьому, характеризує темп відносного загасання коливань в одиницю часу і залежить від амплітуди коливань. Більш жорстка основа закладного масиву, порожнистість якого  $M \leq 6\%$ , погіршує стійкість даної системи, а для нормального її функціонування необхідно, щоб закладний масив складався з неоднорідних за розміром частинок розпушеної гірської породи або мав порожнистість  $M = (9-20)\%$  при зменшенні насипної щільності.

**Ключові слова:** демпфуюча здатність; обвалення; порожнистість; закладний масив; піддатлива опора.

Поступила (received) 24.04.2018