

УДК 622.834: 622.862.3

doi:10.20998/2413-4295.2018.09.03

О НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОМ СОСТОЯНИИ УГЛЕПОРОДНОГО МАССИВА ПРИ РАЗГРУЗКЕ *)

И. В. ИОРДАНОВ¹, Д. А. ЧЕПИГА¹, Ю. И. СИМОНОВА^{1*}, В. Ю. ДОВГАЛЬ²,
А. И. СТОЙЛОВСКИЙ³

¹ГВУЗ «ДонНТУ» МОН Украины, г. Покровск, УКРАИНА

²ГП «Мирноградуголь», г. Мирноград, УКРАИНА

³«Шахта «Капитальная» ГП «Мирноградуголь», г. Мирноград, УКРАИНА

* email: yuliia.simonova@donntu.edu.ua

АННОТАЦИЯ При анализе напряженно-деформированного состояния боковых пород в массиве, вмещающем горные выработки, в результате внезапных обрушений расщелившейся толщи или посадках пород кровли, необходимо учитывать вид и уровень напряжений, характер которых зависит от способа управления кровлей в очистном забое. В условиях, когда отношение длины зависающей породной консоли L , (м) к мощности пород непосредственной кровли h , (м) 5:1, при $L < 5$ м и полном обрушении кровли, разрушение боковых пород будет происходить в результате действия максимальных касательных напряжений. При отношении длины зависающей породной консоли L , (м) к мощности пород непосредственной кровли h , (м) 10:1 и $L > 10$ м, когда позади очистного забоя обеспечиваются поддержание и плавный прогиб подработанной породной толщи, разрушение слоев происходит в результате изгибных деформаций.

Ключевые слова: горная выработка; кровля; боковые породы; напряжения; деформации; обрушения пород.

ON THE STRESSED DEFORMED CONDITION OF THE ROCK MASSIVE AT UNLOADING

I. IORDANOV¹, D. CHEPIGA¹, Y. SIMONOVA^{1*}, V. DOVGAL², A. STOYLOVSKY³

¹Public higher education institution Donetsk National Technical University, Pokrovsk, UKRAINE

²State enterprise "Mirnogradugol", Mirnograd, UKRAINE

³Mine Capital "Mine Capital "State Enterprise" Mirnograugol ", Mirnograd, UKRAINE

ABSTRACT The effectiveness of mining of coal seams and the safety of the introduction of mining operations in mines depends on the condition of the mine workings. The purpose of the present studies is to study the stability of the roof rocks of a coal seam, represented as a load-bearing beam structure under the action of dynamic loads, which, depending on the physical and mechanical properties, dimensions and shape of the cross-section of the girder beam, undergo a certain type and stress level, in depending on the way the roof is managed in the bottom face. When analyzing the stressed-deformed state of the lateral rocks in an array containing mining workings, as a result of sudden collapse of the stratified strata or plantings of roofing rocks, it is necessary to take into account the type and level of stresses, the nature of which depends on the method of controlling the roof in the stope hanging wall. Under the conditions when the ratio of the length of the hanging rock console L , (m) to the thickness of the rocks of the immediate roof h , (m) 5: 1, at $L < 5$ m and the complete collapse of the roof, the destruction of the lateral rocks will occur as a result of the action of the maximum tangential stresses. With a ratio of the length of the rock consoles L , (m) to the thickness of the rocks of the immediate roof h , (m) 10: 1 and $L > 10$ m, when the maintenance and smooth deflection of the subsoil rock bed is ensured behind the extraction face, the fracture of the layers occurs as a result of flexural deformations. The parameters of the beam, as the main bearing element in the system under consideration, have a significant effect on the stability of mine workings, when shock loads are applied to the side rocks. In this case, it is necessary to take into account the physical and mechanical properties of the roof of the coal seam.

Key words: excavation; roof; lateral rocks; stresses; deformations; caving of rocks.

Актуальность работы

Добыча полезных ископаемых в подземных условиях сопровождается целым рядом факторов, приводящих к повышенной опасности для людей и негативному воздействию на окружающую среду.

Опыт работы шахт украинского Донбасса показывает, что с ростом глубины горных работ в углепородном массиве начинает проявляться такой негативный фактор, как расслоение боковых пород, оказывающий существенное влияние на состояние горных выработок и приводящий к возрастанию риска

*) Работа выполняется под научно-методическим руководством докт. техн. наук, проф. Подкопаева С.В. ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет» МОН Украины, г. Покровск.

травмирования горнорабочих в результате обрушений нарушенной породной толщи. Аварии, произошедшие при обрушениях боковых пород на шахтах сопровождаются, как правило, крупным материальным ущербом и невосполнимой утратой потери человеческой жизни.

Считается [1], что обрушениям и обвалам, связанным с отрывом некоторого объема пород от остального массива, всегда предшествует расслоение. По отношению ко всему, слоистость углепородного массива следует рассматривать как фактор, ослабляющий породу, от которого зависит устойчивость кровли разрабатываемых угольных пластов и состояние эксплуатируемых горных выработок [2, 22].

Эффективность отработки угольных пластов и безопасность введения горных работ на шахтах, 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 [3, 5, 17], при выемке угольных 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, наименее интенсивно – при полной закладке выработанного пространства [2].

Несоответствие применяемых способов управления кровлей, средств и способов крепления горных выработок конкретным горно- геологическим условиям угольного предприятия изменяет геомеханическую обстановку в углепородном массиве и создает аварийные ситуации, при которых имеют место завалы горных выработок и травматизм горнорабочих.

Напряженно-деформированное состояние массива осадочных горных пород имеет решающее значение для изучения устойчивости пород кровли, как основного грузонесущего элемента углепородного массива и горных выработок, особенно при действии на них кратковременных динамических нагрузок, которые имеют место при обрушениях боковых пород и могут полностью изменить природу разрушения [12, 14, 15].

Постановка задачи

Целью настоящих исследований является изучение устойчивости пород кровли угольного пласта, представленной в виде несущей конструкции-балки при действии на нее динамических нагрузок, которые в зависимости от физико- механических свойств, размеров и формы поперечного сечения породной балки, претерпевают определенного вида и уровня напряжения, в зависимости от способа управления кровлей в очистном забое.

Изложение материала и результаты

Согласно гипотезе балок [4] можно предположить, что в очистном забое непосредственная и основная кровли, представленные твердыми слоистыми породами, деформируются и разрушаются подобно консольным балкам. Устойчивость породного обнажения в призабойном пространстве лавы, существенно зависит от степени предварительной трещиноватости кровли, сформировавшейся впереди очистного забоя, а так же в результате ее прогиба, когда отдельные блоки расслоившейся породной толщи работают как шарниры [5].

Для того чтобы выполнить анализ напряженно-деформационного состояния пород кровли разрабатываемого пласта, и установить природу разрушения углепородного массива необходимо определить величины действующих в рассматриваемой системе напряжений с учетом динамического воздействия, т.е. в результате внезапного приложения нагрузки, что в реальных условиях разработки угольных пластов, соответствует внезапной посадке пород кровли или обрушениям боковых пород.

Динамический прогиб балки δ , (м) можно определить приравняв работу, совершаемую нагрузкой, энергии деформации, накопленной в балке [6-8, 18].

Отмечается [11], что в выражении

$$\delta = \delta_{ст} + \sqrt{\delta_{ст}^2 + 2h\delta_{ст}}, \quad (1)$$

где $\delta_{ст}$ -статический прогиб балки, м; при $h=0$, $\delta=2\delta_{ст}$ и это означает, что когда груз к балке прикладывается мгновенно или внезапно, такая ситуация является наиболее опасной для грузонесущей конструкции.

Рассмотрим породы кровли мощностью $h=1$ м разрабатываемого угольного пласта в виде консольной балки, длиной L , (м) (рис.1). В поперечном сечении такой балки при воздействии силы F , (Н) возникают два силовых фактора: изгибающий момент M , (Н•м) и поперечная сила $Q=F$, (Н).

Известно [8, 9], что изгибающий момент M , (Н•м) реализуется в поперечном сечении балки системой нормальных напряжений σ (МПа). Поперечная сила Q , (Н), вектор которой лежит в плоскости сечения, вызывает в точках сечения касательные напряжения τ , (МПа).

Равновесие системы, в этом случае, обеспечивается условием

$$\sum y = 0; Q = F = \int \tau dA. \quad (2)$$

В действительности, касательные напряжения распределяются по сечению неравномерно. Однако, если принять допущение о равномерном

распределении напряжений, что широко используется на практике [11, 16], то

$$F = \tau \cdot A \quad (3)$$

и

$$\tau = \frac{F}{A}. \quad (4)$$

На рис.1б в элементе ABCD длиной $l < 5$, (м) выделим величину ΔS , (м) абсолютный сдвиг и γ -относительный сдвиг.

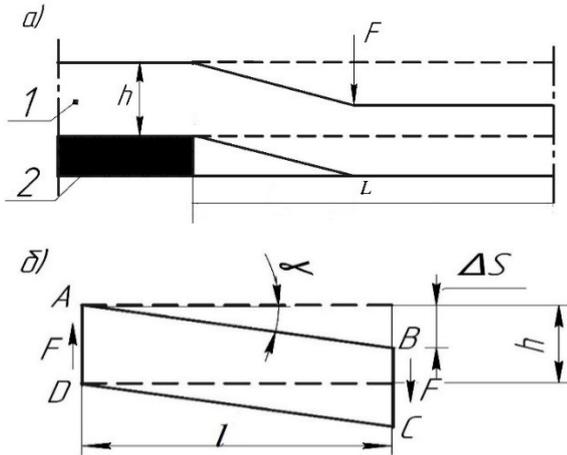


Рис.1 – Определение величины сдвиговой податливости при определении напряженно-деформированного состояния пород кровли (1) разрабатываемого угольного пласта (2) а) общая схема; б) расчетная схема: F – внешняя нагрузка, имеющая размерность силы, (Н); L – длина балки, h – мощность пород кровли, (м); l – длина элемента ABCD, (м); h – мощность пород кровли, (м); ΔS – абсолютный сдвиг, (м); γ – относительный сдвиг элемента

В этом случае

$$\gamma \approx \text{tg} \gamma = \frac{\Delta S}{l}. \quad (5)$$

В области упругих деформаций справедлив закон Гука [11], а значит

$$\tau = G \cdot \gamma \quad (6)$$

где G - модуль сдвига, МПа.

С учетом вышеизложенного для случая чистого сдвига, имеем

$$\frac{F}{A} = G \frac{\Delta S}{l}, \quad (7)$$

откуда

$$\Delta S = \frac{F \cdot b}{G \cdot A}, \quad (8)$$

где A - площадь грани BC в элементе ABCD, м²; b - ширина элемента, м.

При деформации балки, грань BC в элементе ABCD перемещается на расстояние ΔS , (м), когда сдвигающая сила F , (Н) увеличивается от нуля до ее конечного значения (рис 1,б). Такое перемещение определяется выражением (8). Выражение (6) принимает вид

$$\tau = G \cdot \frac{\Delta S}{l}, \quad (9)$$

из которого видно, что с увеличением длины элемента l , (м), величина касательных напряжений τ , (МПа), уменьшается.

Известно [8, 12, 13], что внешние силы, деформируя балку, совершают работу. Эта работа переходит в потенциальную энергию деформации. В одних случаях и при определенных условиях, деформирование породной балки и ее разрушение может происходить в результате изгиба, в других – за счет деформации сдвига.

Определим прогибы однородной консольной породной балки длиной L , (м), с учетом сдвигов от равномерно распределенной нагрузки q , (Н/м), которая зависит от веса расслоившейся породной толщи (рис.2).

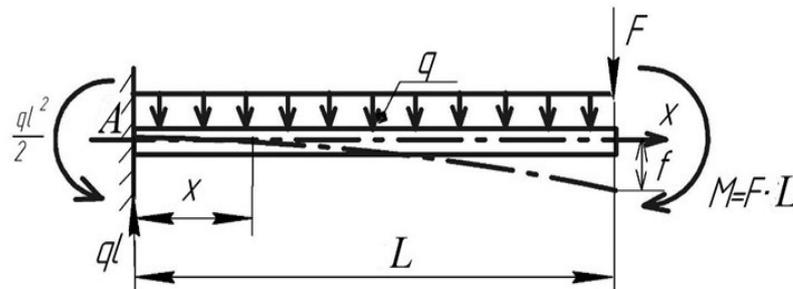


Рис. 2 – Расчетная схема к определению величины прогиба f , (м) консольной балки длиной L , (м) от равномерно распределенной нагрузки q , (Н/м): M - изгибающий момент, (Н•м); Q - поперечная сила, (Н); F - возмущающая сила, (Н)

Для решения такой задачи воспользуемся системой уравнений, и тогда согласно [11, 23]

$$\begin{cases} \frac{d\varphi}{dx} = -\frac{M}{EI}, \\ \frac{df}{dx} = \varphi + \frac{kQ}{GA}. \end{cases} \quad (10)$$

Где f - прогиб балки, м; φ - угол поворота, м; G - модуль сдвига, МПа; A -площадь поперечного сечения балки, м², $A=bh$; Q -поперечная сила, Н; I - момент инерции сечения балки, м⁴;

$$I = \frac{bh^3}{12}. \quad (11)$$

Из первого уравнения системы определим

$$\varphi = -\int_0^x \frac{Mdx}{EI} + \varphi_0. \quad (12)$$

из второго уравнения системы

$$f = \int_0^x \varphi dx + \int_0^x \frac{kF}{GA} dx + f_0. \quad (13)$$

где φ_0 и f_0 - соответственно, начальный угол поворота и прогиб балки.

Для рассматриваемого случая

$$M = -q\left(\frac{L^2}{2} + \frac{x^2}{2} - Lx\right) \quad (14)$$

$$Q = q(L - x). \quad (14a)$$

В жесткой заделке выполняются условия, когда в т. А угол поворота $\varphi_0 = 0$ и прогиб $f_0 = 0$. Поэтому для определения значения φ и f получим следующие выражения

$$\varphi = \frac{q}{2}\left(\frac{L^2x}{EI} - \frac{Lx^2}{EI} + \frac{x^3}{3EI}\right), \quad (15)$$

$$f = q\left(\frac{L^2x^2}{4EI} - \frac{Lx^3}{6EI} + \frac{x^4}{24EI} + \frac{k}{GA}\left(Lx - \frac{x^2}{2}\right)\right). \quad (16)$$

Выражение для определения прогиба балки f , (м) в результате действия равномерно распределенной нагрузки можно представить, как

$$f = f_M - f_G, \quad (17)$$

где f_M -прогибы, вызванные изгибающими моментами, (м); f_G - прогибы, вызванные деформацией сдвига, (м).

В случае, когда $x=L$ прогиб на конце балки определяется как

$$f_G = \frac{kqL^2}{2GA}, \quad (18)$$

$$f_M = \frac{qL^4}{8EI}. \quad (19)$$

Тогда, с учетом этого

$$\frac{f_G}{f_M} = 4\frac{E}{G} \cdot \frac{I}{AL^2} \cdot k, \quad (20)$$

где k - коэффициент, учитывающий неравномерность распределения касательных напряжений при сдвиге, $k=1,2$ [10]; E - модуль упругости балки, МПа.

На рис. 3 представлена зависимость, отражающая изменение прогиба консольной балки вызванного деформацией сдвига f_G , (м), к величине прогиба такой балки при действии изгибающего момента f_M , (м) с учетом равномерно распределенной нагрузки q , (Н/м).

Нами установлено, что отношение исследуемых величины $\frac{f_G}{f_M} = 1,13$ для балки, длина которой $L=1$ м, уменьшается до $\frac{f_G}{f_M} = 0,011$ при $L=10$ м (рис.3). В случае когда $L=60$ м, $\frac{f_G}{f_M} = 0,0003$. Очевидно, в длинных балках, при анализе напряженно- деформированного состояния боковых пород и определении величины прогиба, деформациями сдвига можно пренебречь.

При изучении влияния энергии искривления консольной балки в результате изгиба U_M , (Дж) и сдвига U_G , (Дж), при значении коэффициента Пуассона $\nu=0,3$ нами была установлена зависимость в виде

$$\frac{U_G}{U_M} = \frac{0.78h^2}{L^2}, \quad (21)$$

и график, изображенный на рис.4, из которого видно, что деформациями сдвига при расчете длинных балок на изгиб, можно пренебречь.

Определим величины напряжений в консольной балке. Согласно [8, 16] наибольшее по величине напряжение возникает в заделке, т.е. в т. А (рис.2).

$$\sigma_{max} = \frac{M}{W}, \quad (22)$$

$$\tau_{max} = \frac{3F}{2A}, \quad (23)$$

где W - момент сопротивления изгибу, м³

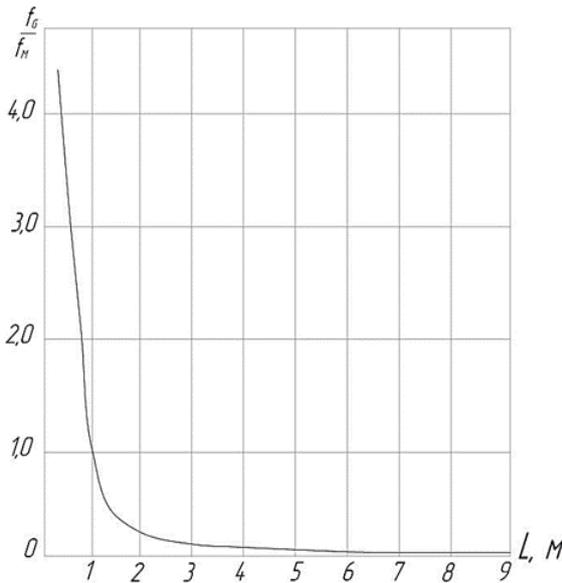


Рис. 3 – Отношение прогиба f_G , (м) вызванного деформациями сдвига к прогибу f_M , (м) в результате изгиба консольной балки длиной L , (м) от действия равномерно распределенной нагрузки q , (Н/м)

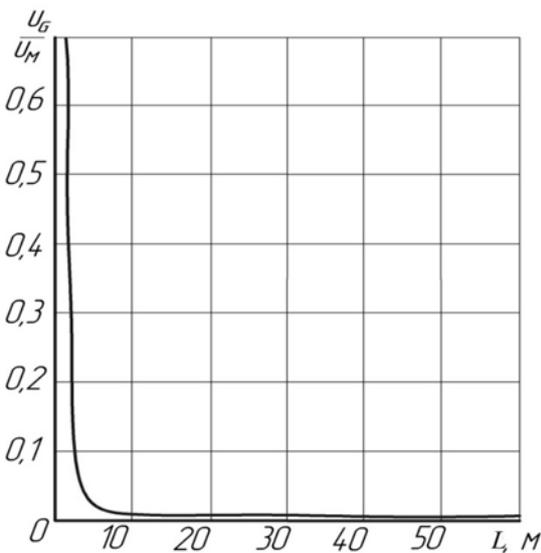


Рис. 4 – Отношение потенциальной энергии деформаций сдвига U_G , (Дж) к потенциальной энергии деформаций изгиба U_M , (Дж) при действии на консольную балку длины L , (м) равномерно распределенной нагрузки q , (Н/м)

С учетом рассматриваемого нами случая, максимальные нормальные напряжения можно определить, как

$$\sigma_{max} = \frac{6M}{bh^2} \quad (24)$$

Максимальные касательные напряжения определяются по выражению

$$\tau_{max} = \frac{3F}{2A}, \quad (25)$$

где b - ширина балки, м.

Оценим отношение нормальных и касательных напряжений при изгибе балки от равномерно распределенной нагрузки. Сопоставив после соответствующих преобразований выражение (24) и (25), получим отношение

$$\frac{\sigma_{max}}{\tau_{max}} = 2 \frac{L}{h}. \quad (26)$$

из которого видно, что с увеличением длины балки нормальные напряжения увеличиваются, а касательные - уменьшаются. Определяющими параметрами при этом являются длина балки L , (м) и мощность пород непосредственной кровли h , (м) разрабатываемого угольного пласта.

Как видно из выражений (9) и (26), а так же приведенных нами зависимостей (рис.3 и рис.4), в случае когда длина балки $L > 10$ м, при отношении длины L , (м) к высоте h , (м) 10:1, разрушение пород кровли происходит в результате изгиба, при достижении предельной величины обнажения.

При длине балки $L < 5$ м и отношении длины L , (м) к высоте h , (м) 5:1, кровля угольного пласта разрушается в результате сдвига. В этом случае, для прогнозирования устойчивости пород кровли, требуется проверка их прочности на сдвиг [20, 21], т.е. имеем условие, когда разрушение может происходить от действия максимальных касательных напряжений,

$$\tau_{max} \leq R_{сд}, \quad (27)$$

где $R_{сд}$ - расчетное сопротивление пород кровли на сдвиг, МПа.

Применительно к рассматриваемой задаче, в расчетах при прогнозировании устойчивости пород кровли необходимо учитывать варианты опирания свободного конца балки, т.е. способ управления кровлей в лаве.

Из практики работы глубоких шахт видно, что наиболее распространенным видом проявления горного давления в очистных выработках в результате разгрузки углепородного массива, является расслоение пород подработанной толщи и обрушение пород кровли при достижении критических обнажений [5].

Рассмотрим породы кровли разрабатываемого угольного пласта в виде балки, (рис.5а) которая имеет опоры А и В, расстояние между которыми a , (м) (рис.5 б,в). В одном случае, балка имеет в т. А жесткое защемление (рис.5, б), в другом - неподвижную шарнирную опору (рис.5, в).

Согласно [10, 11], прогиб f , (м) такой балки с учетом сдвига можно определить по выражению

$$f = \frac{F(L-a)^2L}{3EI} + \left(1 + \frac{3EI}{aLGS}\right), \quad (28)$$

где a - ширина призабойного пространства, м; E - модуль упругости, Н/м²; G - модуль сдвига, Н/м²; I - момент инерции балки, м⁴.

В (28) выражение

$$\frac{3EI}{aLGS} \quad (29)$$

определяет величину сдвиговой податливости, т.е. перемещение балки, обусловленные сдвигами. С учетом выражения (29) установлено, что с увеличением длины балки L , (м), при постоянной ширине призабойного пространства, когда $a = 5$ м, величина сдвиговой податливости уменьшается (рис.6). Очевидно, что при малых значениях a , (м), и L , (м), когда $a < 5$ м, и $L < (5-10)$ м, необходимо учитывать перемещения, обусловленные сдвигами и для таких случаев справедливо требование (27).

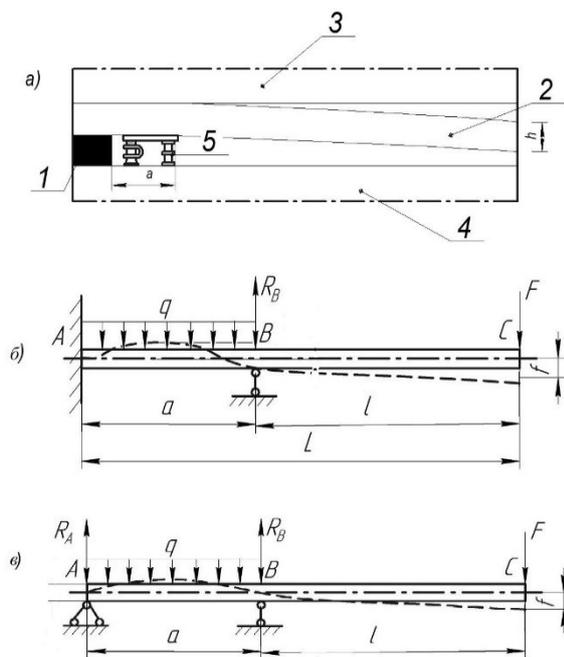


Рис. 5 – Расчетная схема к определению устойчивости расщелившихся пород кровли разрабатываемого угольного пласта: а) общая схема взаимодействия породных слоев постоянной жесткости: 1- угольный пласт; 2- непосредственная кровля; 3- основная кровля; 4- почва; 5- крепь в призабойном пространстве лавы; б) консольная балка; в) балка с неподвижными шарнирными опорами; L - длина балки, м; a - ширина призабойного пространства, м; l - длина свободного конца балки, м; f - прогиб балки в точке C , м; h - высота балки-мощность пород непосредственной кровли, м; F - действующая сила, Н; R_A, R_B – реакция опор в т.А и т.В, Н

Известно [10, 11], что деформации сдвига создают дополнительный прогиб балки. Оценим величину этого прогиба, в общем прогибе балки, длина которой изменяется от $L = 10$ м до $L = 60$ м. Обозначим, через $\delta_{сдв.}$, (м) прогиб, зависящий только от сдвига и определим его величину как это рекомендовано в [11]

$$\delta_{сдв.} = \frac{\alpha_{сдв.} \cdot Q}{G \cdot S}, \quad (30)$$

где $\frac{Q}{S}$ – среднее касательное напряжение, полученное делением поперечной силы Q , (Н) на площадь поперечного сечения балки S , (м²); α - коэффициент сдвига,

$$\alpha_{сдв.} = \frac{12 + 11\nu}{10(1 + \nu)}, \quad (31)$$

ν - коэффициент Пуассона.

На рис.7 приведены зависимости, отражающие изменение величины прогиба $\delta_{сдв.}$, (м) зависящего только от сдвига при различной длине балки L , (м).

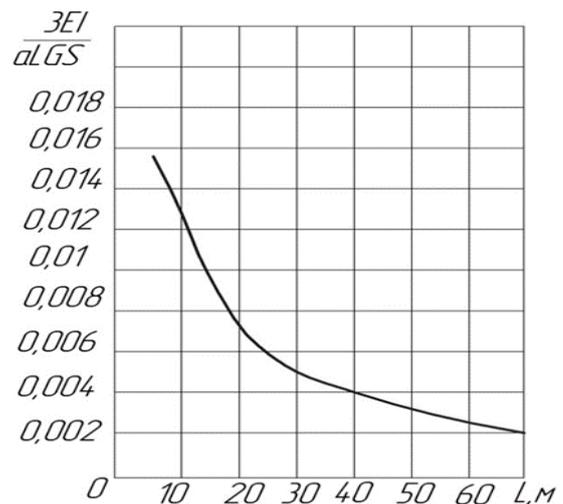


Рис. 6 – Изменение величины сдвиговой податливости $\frac{3EI}{aLGS}$ балки от ее длины L , (м) при ширине призабойного пространства $a = 5$ м

Из приведенных зависимостей (рис.7) видно, что с увеличением длины балки L , (м) и ширины призабойного пространства a , (м), ее прогиб зависящий только от сдвига, увеличивается. Но эти величины настолько малы, что ими в общей величине прогиба длиной балки, когда $L > 10$ м, можно пренебречь (рис.7).

Для обеспечения эксплуатационного состояния горных выработок, когда расщелившаяся породная толща эффективно поддерживается позади очистного забоя и плавно прогибается, необходимо чтобы основные несущие элементы в такой выработке были устойчивыми, а вид и уровень напряжений,

возникающих в боковых породах, соответствовали условиям прочности для определённого типа пород.

В таких условиях критические напряжения, вызывающие потерю устойчивости балки определяются по формуле Эйлера [6, 19] и зависят от ее гибкости. При этом, действующие в любом сечении балки напряжения не должны превышать предела пропорциональности. В тех случаях, когда такие условия не выполняются, формула Эйлера принимает вид

$$\sigma_{max} = [\sigma_{изг}],$$

где $[\sigma_{изг}]$ - предел прочности пород кровли на изгиб, МПа, а разрушение балок будет происходить от действующих напряжений в результате их изгиба, когда последние достигают своих предельных значений.

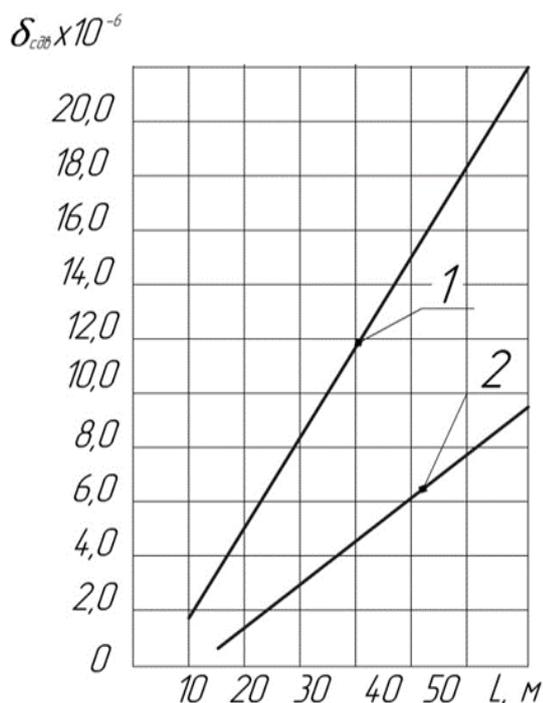


Рис. 7 – Изменение величины прогиба балки, зависящего только от сдвига $\delta_{сдв}$, (м) при различной длине L , (м) и ширине призабойного пространства a , (м), $G = 6000$ МПа, $\nu = 0.3$ и $\alpha_{сдв} = 1,11$: 1- $a=5$ м; 2- $a=10$ м

Таким образом, при разработке угольных пластов в сложных горно- геологических условиях, напряженно- деформационное состояние боковых пород зависит от способа управления кровлей в очистном забое, физико- механических свойств и параметров породной балки, как основного несущего элемента расслоившегося породного массива. При полном обрушении кровли, когда длина балки $L < 5$ м, при отношении длины балки L , (м) к мощности пород непосредственной кровли h , (м) 5:1, при внезапных

обрушениях расслоившейся толщи, разрушение происходит в результате сдвига.

Использование закладки выработанного пространства, позволит обеспечить эффективное поддержание и плавный прогиб расслоившейся породной толщи позади очистного забоя. В этом случае, при отношении $L:h$ как 10:1, когда длина балки $L > 10$ м, величиной сдвиговой податливости можно пренебречь, а разрушение кровли будет происходить за счет изгибных деформаций, при превышении предельных значений породных обнажений.

Вывод

Напряженно-деформированное состояние боковых пород в массиве, вмещающем горные выработки, при внезапных обрушениях нарушенной толщи или посадках пород кровли, определяется видом и уровнем напряжений, зависящих от способа управления кровлей в очистном забое. При полном обрушении кровли в очистном забое, разрушение боковых пород происходит в результате сдвига. В случае применения закладки выработанного пространства, разрушение боковых пород происходит в результате действующих изгибных напряжений.

Список литературы

1. Левкин, Н. Б. Предотвращение аварий и травматизма в угольных шахтах Украины. – Донецк: Донбасс, 2002. - 393 с.
2. Андрушко, В. Ф. Управление кровлей в сложных горно- геологических условиях / В. Ф. Андрушко, С. А. Саракитянец, Ю. Г. Спицын. - К.: Техника, 1985. - 372 с.
3. Давидянец, В. Т. Совершенствование способов и средств управления кровлей на шахтах Донбасса. / В. Т. Давидянец. – М.; Недра, 1969. – 277 с.
4. Шашенко, А. Н. Геомеханика / А. Н. Шашенко, В. П. Пустовойшенко, Е. А. Сдвижикова. - К.: Новый друк, 2016. - 528 с.
5. Борисов, А. А. Механика горных пород и массивов / А. А. Борисов. - М.: Недра, 1980. - 380 с.
6. Циглер, Ф. Механика твердых тел и жидкостей / Ф. Циглер. - Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика». - 2002. - 912 с.
7. Varuh, H. Applied Dynamics / H. Varuh. – Taylor Francis Group. LLS., 2015. – 872 p.
8. Тимошенко, С. П. Теория упругости / С. П. Тимошенко, Дж. Гудьер. – М.; Наука, 1979. – 560 с.
9. Strauh, D. Classical Mechanics: An Introduction / D. Strauh. – Springer, 2009. – 422 p.
10. Пановко, Я. Г. Механика деформируемого твердого тела. Современные концепции, ошибки и парадоксы / Я. Г. Пановко. – М.; Наука, 1985. – 288 с.
11. Тимошенко, С. П. Механика материалов / С. П. Тимошенко, Дж. Гере. – СПб.: Изд-во «Лань», 2002. – 672 с.
12. Никифоровский, В. С. Динамическое разрушение твердых тел / В. С. Никифоровский, Е. М. Шемякин. – Новосибирск: Наука, 1979. – 274 с.

13. Прочность и разрушение при кратковременных нагрузках / **Х. А. Рахматулин, Е. А. Шемякин, Ю. А. Демьянов, А. В. Звягин.** – М.: Университетская книга; Логос, 2008. – 624 с.
14. **Ставрогин, А. Н.** Экспериментальная физика и механика горных пород / **А. Н.Ставрогин, Б. Г.Тарасов.** – СПб: Наука, 2001. – 343 с.
15. **Работков, Ю. Н.** Элементы наследственной механики твердых тел / **Ю. Н. Работков.** – М.: Наука, 1977. – 384 с.
16. **Kleppner, D.** An introduction to Mechanics / **D. Kleppner, R.Kolenkow.** – Cambridge University Press, 2014. – 542 p.
17. **Linkov, A. M.** The Problem of Stability and Dynamic Phenomena in Mines Soc. Rock Mechanics / **A. M. Linkov.** – P1799. Lisboa Cedex, 1994. – 132 p.
18. **Hoek, E.** Practical estimates of rock mass strength / **E. Hoek, E. T. Brown** // *Int.J.Rock Mech. Min. Science.* – 1997. – No. 34 (8). – P. 165-168. – doi: 10.1016/S1365-1609997080069-x.
19. **Alber, M.** Investigation of Limestone Pillar Failure / **M. Alber, J. Heiland** // *Rock Mech. Rock Engng.* – 2001. – No.34 (3) – P.167-186. doi:10.1007/s00603030170007.
20. **Ержанов, Ж. С.** Ползучесть осадочных горных пород. Теория и эксперимент / **Ж. С. Ержанов, А. С. Сагинов, Г. Н. Гуменюк, А. А. Сарсенбаев.** – Алма-Ата; Наука, 1970. – 208 с.
21. **Разумовский, И. А.** Интерференционно-оптические методы механики деформируемого твердого тела / **И. А. Разумовский.** – М.: Изд-во МГТУ им.Н.Э. Баумана, 2007. – 240 с.
22. **Подкопаев, С. В.** О напряженно-деформированном состоянии боковых пород при внезапном обрушении основной кровли / **С. В. Подкопаев, И. В. Иорданов, Д. А. Чепига** // *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. Випуск 1/2017 (102).* – с. 66 – 71.
23. **Александров, А. В., Потанов В. Д., Державин Б. П.** Сопrotивление материалов / **А. В. Александров, В. Д. Потанов, Б. П. Державин.** – М.: Высшая школа, 2003-560 с.
5. **Borisov, A. A.** Mekhanika gornyykh porod i massivov.- М.: Nedra, 1980. - 380 s.
6. **Tsigler, F.** Mekhanika tverdykh tel i zhidkostey. - Izhevsk: NITS «Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika» - 2002.- 912 s.
7. **Baruh, H.** Applied Dynamics. Taylor Francis Group. LLS., 2015. – 872 p.
8. **Timoshenko, S. P.,** Gud'yer Dzh. Teoriya uprugosti. – М.: Nauka, 1979. – 560 s.
9. **Strauh, D.** Classical Mechanics: An Introduction. – Springer, 2009. – 422 p.
10. **Panovko, Y. G.** Mekhanika deformiruyemogo tverdogo tela. Sovremennyye kontseptsii, oshibki i paradoksy. – М.: Nauka, 1985. – 288 s.
11. **Timoshenko, S. P., Gere, Dzh.** Mekhanika materialov. – SPb.: Izd-vo «Lan'», 2002. – 672 s.
12. **Nikiforovskiy, V. S., Shemyakin, Y. M.** Dinamicheskoye razrusheniye tverdykh tel. – Novosibirsk: Nauka, 1979. – 274 s.
13. Prochnost' i razrusheniye pri kratkovremennykh nagruzkakh / **K. A. Rakhmatulin, Y. A. Shemyakin, Y. A. Dem'yanov, A. V. Zvyagin.** – М.: Universitetskaya kniga; Logos, 2008. – 624 s.
14. **Stavrogin, A. N., Tarasov, B. G.** Eksperimental'naya fizika i mekhanika gornyykh porod. – SPb:Nauka, 2001. – 343 s.
15. **Rabotkov, Y. N.** Elementy nasledstvennoy mekhaniki tverdykh tel. – М.: Nauka, 1977. – 384 s.
16. **Kleppner, D., Kolenkow, R.** An introduction to Mechanics. – Cambridge University Press, 2014. – 542 p.
17. **Linkov, A. M.** The Problem of Stability and Dynamic Phenomena in Mines Soc. Rock Mechanics, P1799. Lisboa Cedex, 1994. – 132 p.
18. **Hoek, E., Brown, E. T.** Practical estimates of rock mass strength. *Int.J.Rock Mech. Min. Science*, 1997, **34** (8), 165-168, doi: 10.1016/S1365-1609997080069-x.
19. **Alber, M. and Heiland, J.** Investigation of Limestone Pillar Failure. *Rock Mech. Rock Engng.*, 2001, **34** (3), 167-186, doi:10.1007/s00603030170007.
20. **Yerzhanov, Z. S., Saginov, A. S., Gumenyuk, G. N., Sarsenbayev, A. A.** Polzuchest' osadochnyykh gornakh porod. Teoriya i yeksperiment. – Alma-Ata; Nauka, 1970. – 208 s.
21. **Razumovskiy, I. A.** Interferentsionno-opticheskiye metody mekhaniki deformiruyemogo tverdogo tela. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. – 240 с.
22. **Podkopayev, S. V., Iordanov, I. V., Chepiga, D. A.** O napryazhenno-deformirovannom sostoyanii bokovykh porod pri vnezapnom obrushenii osnovnoy krovli. *Vіsник КрНУ імені Михайла Остроградського. Vip. 1/2017 (102)*, 66 - 71
23. **Aleksandrov, A. V., Potapov, V. D., Derzhavin, B. P.** Soprotivleniye materialov. М.: Vysshaya shkola, 2003 – 560 s.

Bibliography (transliterated)

1. **Levkin, N. B.** Predotvrashcheniye avariy i travmatizma v ugol'nykh shakhtakh Ukrainy. – Donetsk: Donbass, 2002. - 393 s.
2. **Andrushko, V. F., Sarakityants, S. A., Spitsyn, Y. G.** Upravleniye krovley v slozhnykh gorno- geologicheskikh usloviyakh.- К.: Tekhnika, 1985. - 372 s.
3. **Davidyants, V. T.** Sovershenstvovaniye sposobov i sredstv upravleniya krovley na shakhtakh Donbassa. – М.: Nedra, 1969 – 277 s.
4. **Shashenko, A. N., Pustovoyshenko, V. P., Sdvizhikova, Y. A.** Geomekhanika.- К.: Novyy druk, 2016. - 528 s.

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 Iordanov – 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.

Симонова Юлія Игоревна - аспирант кафедры «Разработка месторождений полезных ископаемых», Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет», г. Покровск, Украина; e-mail: yuliia.simonova@donntu.edu.ua.

Yuliia Simonova - graduate student, Public higher education institution Donetsk National Technical University, Pokrovsk, Ukraine; e-mail: yuliia.simonova@donntu.edu.ua.

Довгаль Виталий Юрьевич - генеральный директор ГП «Мирноградуголь», г. Мирноград, Украина.

Vitaliy Dovgal - General Director of the State Enterprise "Mirnogradugol", Mirnograd, Ukraine.

Стойловский Александр Иванович - директор «Шахта «Капитальная» ГП «Мирноградуголь».

Aleksandr Stoylovskiy - Director of "Mine Capital" Mine Capital "State Enterprise" Mirnogradugol", Mirnograd, Ukraine.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Иорданов, И. В. О напряженно-деформированном состоянии углепородного массива при разгрузке / **И. В. Иорданов, Д. А. Чепига, Ю. И. Симонова, В. Ю. Довгаль, А. И. Стойловский** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2018. – № 9 (1285). – С. 22-30. – doi:10.20998/2413-4295.2018.12.01.

Please cite this article as:

Iordanov, I., Chepiga, D., Simonova, Y., Dovgal, V., Stoylovskiy, A. On the stressed deformed condition of the rock massive at unloading. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, 9 (1285), 22–30, doi:10.20998/2413-4295.2018.09.03.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Иорданов, И. В. Про напружено-деформований стан вуглепородного масива при розвантаженні / **И. В. Иорданов, Д. А. Чепига, Ю. И. Симонова, В. Ю. Довгаль, А. И. Стойловский** // *Вісник НТУ «ХПИ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПИ». – 2018. – № 9 (1285). – С. 22-30. – doi:10.20998/2413-4295.2018.09.03.

АНОТАЦІЯ При аналізі напружено-деформованого стану бічних порід в масиві, що вміщає гірські вироблення, в результаті раптових обвалень товщі, яка розширюється, або посадках порід покрівлі, необхідно враховувати вид і рівень напружень, характер яких залежить від способу управління покрівлю в очисному заборі. В умовах, коли відношення довжини, що зависла від породної консолі L , (м) до потужності порід безпосередньої покрівлі h , (м) 5: 1, при $L < 5$ м і повному обваленні покрівлі, руйнування бічних порід відбуватиметься в результаті дії максимальних дотичних напружень. При відношенні довжини залежної від породної консолі L , (м) до потужності порід безпосередньої покрівлі h , (м) 10: 1 і $L > 10$ м, коли позаду очисного забою забезпечує підтримку і плавний прогин підробленої породної товщі, руйнування шарів відбувається в результаті вигинистих деформацій.

Ключові слова: гірничі виробки; покрівля; бічні породи; напруги; деформації; обвалення порід.

Поступила (received) 08.03.2018