

### О НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОМ СОСТОЯНИИ БОКОВЫХ ПОРОД В СЛОЖНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

**И. В. Иорданов, Д. А. Чепига, А. В. Положий**

Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет»  
пл. Шибанкова, 2, г. Покровск, Донецкая обл., 85300, Украина. E-mail: daria.chepiha@donntu.edu.ua

**В. Ю. Довгаль**

Государственное предприятие «Мирноградуголь»  
ул. Ватутина, 1, г. Мирноград, Донецкая обл., 85322, Украина.

**А. В. Король**

Ш/У «Добропольское» ДТЭК «Добропольеуголь»  
просп. Шевченко, 2, г. Доброполье, Донецкая область, 85000, Украина.

При анализе напряженно-деформированного состояния углепородного массива, вмещающего выработки, породы кровли можно считать породной балкой, имеющей различные варианты опирания, в зависимости от способа управления горным давлением в очистном забое. Доказано, что при отношении длины зависающей породной консоли или балки длиной  $L$ , (м) к мощности пород непосредственной кровли  $h$ , (м) 10:1, когда  $L > 10$  м, учетом сдвиговой податливости при расчете величины прогиба можно пренебречь. Вместе с тем, без эффективного поддержания пород кровли по всей длине балки в рассматриваемой системе при определенных условиях, может наступить бифуркация. Во избежание такой ситуации рекомендуется применение закладки выработанного пространства или широких податливых полос, что позволит уменьшить жесткость системы и величину внешней силы при ударе расслоившихся пород о балку, а также улучшить устойчивость боковых пород позади очистного забоя. В случае применения широкой податливой полосы или закладки выработанного пространства, для поддержания расслоившейся породной толщи, непосредственная кровля с одной стороны опирается на массив угля, с другой – на податливую опору. При минимальном расстоянии  $a = (3-5)$  м между этими опорами в результате действия внешней силы в кровле возникают сжимающие усилия. При постоянной ширине призабойного пространства величина сжимающих усилий и радиус отрицательной кривизны породной балки зависят от места приложения силы, ее величины и длины той части балки, которая опирается на закладочный массив или податливую опору.

**Ключевые слова:** угольный пласт, боковые породы, обрушения, призабойное пространство, консольная балка, балка с неподвижными шарнирными опорами.

### ПРО НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН БІЧНИХ ПОРІД У СКЛАДНИХ ГІРНИЧО-ГЕОЛОГІЧНИХ УМОВАХ

**І. В. Іорданов, Д. А. Чепіга, А. В. Положий**

Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет»  
пл. Шибанкова, 2, м. Покровськ, Донецька обл., 85300, Україна. E-mail: daria.chepiha@donntu.edu.ua

**В. Ю. Довгаль**

Державне підприємство «Мирноградвугілля»  
вул. Ватутина, 1, м. Мирноград, Донецька обл., 85322, Україна.

**А. В. Король**

Ш/У «Добропільське», ДТЕК «Добропільвугілля»  
просп. Шевченка, 2, м. Добропілля, Донецька область, 85000, Україна.

При аналізі напружено-деформованого стану вуглепородного масиву породи покрівлі можна вважати породою балкою, що має різні варіанти обпирання, в залежності від способу управління гірничим тиском в очистному забої. Доведено, що при відношенні довжини завислої породної консолю або балки довжиною  $L$ , (м) до потужності порід безпосередньої покрівлі  $h$ , (м) 10:1, коли  $L > 10$  м, урахуванням зсувної піддатливості при розрахунку величини прогину можна знехтувати. Обґрунтовано, що руйнування покрівлі розроблювального вугільного пласта, як основного вантажонесучого елемента вуглепородного масиву, в складних гірничо-геологічних умовах, відбувається, в кінцевому підсумку, у результаті вигину породних шарів, при досягненні граничних величин оголень. Разом з тим, без ефективної підтримки порід покрівлі по всій довжині балки в даній системі за певних умов, може наступити бифуркація. Щоб уникнути такої ситуації пропонується застосовувати закладку виробленого простору або широкі піддатливі смуги, що дозволить зменшити жорсткість системи і величину зовнішньої сили при ударі розшарованих порід об балку, а так само поліпшити стійкість бокових порід позаду очисного вибою. У разі застосування широкої піддатливою смуги або закладки виробленого простору, для підтримки розшарованої породної товщі, безпосередня покрівля з одного боку спирається на масив вугілля, з іншого – на піддатливу опору. При мінімальній відстані  $a = (3-5)$  м між цими опорами, у результаті дії сили у покрівлі виникають стискаючі зусилля. При постійній ширині привибійного простору величина стискаючих зусиль і радіус негативної кривизни породної балки залежать від місця прикладання сили, її величини і довжини тієї частини балки, яка спирається на закладний масив, або піддатливу опору.

**Ключові слова:** вугільний пласт, бічні породи, обвалення, призабійний простір, консольна балка, балка з нерухомими шарнірними опорами.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РАБОТИ.** В складившихся в Україні умовах забезпечення країни топливно-енергетичними ресурсами набуває первостепенного значення. Одним з таких ресурсів є кам'яний вугілля, який в достатньому кількості залягає в надрах українського Донбасу, однак видобуток його з кожним роком стає все складніше і затратніше. Особливо важливу роль в успішній розробці вугільних родовищ грають підготовчі роботи, підтримка яких в експлуатаційному стані не тільки знижує собівартість вугілля, але і є гарантією стабільної та аварійної роботи підприємства.

Досвід роботи шахт українського Донбасу показує, що з ростом глибини гірських робіт в вугільному масиві починає проявлятися такий негативний фактор як розшарування бокових порід, який має суттєвий вплив на стан гірських виробок і призводить до їх закриття, а також до травматизму гірників.

Детальний аналіз аварій, що відбулися на шахтах України в період 2000–2017 рр., дозволяє зробити висновок про те, що основними причинами закриття виробок і високого рівня травматизму при розробці вугільних пластів на великих глибинах є недостатнє вивчення природи обвалення і, в зв'язі з цим, прийняття помилкових технічних рішень при виборі способу управління гірським тиском в очистному забію та охорони штреків.

Вивчення природи обвалення як різноманітності небезпечних проявів гірського тиску, їх вплив на стан бокових порід, в тому числі порід кровлі, і, на основі цього, розробка ефективних заходів, спрямованих на збереження гірських виробок в експлуатаційному стані за весь період їх служби, сприятиме створенню умов безпечної роботи гірників в умовах глибоких шахт з складними гірсько-геологічними умовами.

Вивчення особливостей прояву гірського тиску в виробках на великій глибині дозволило встановити, що характер його небезпечних проявів визначається не тільки напруженим станом масиву осадочних гірських порід і їх фізико-механічними властивостями, але і специфікою формування останнього, спричиненою неупругою деформацією при об'ємному стисненні, а також здатністю деформуватися і руйнуватися при розвантаженні [1].

В реальних умовах розробки вугільних пластів, при відсутності підпори з боку виробничого простору, небезпечна ситуація виникає при обваленні та обваленні товщини порід. В околицях гірських виробок підірвані та розшарувані бокові породи, що осідають на хаотично обвалені шари кровлі, представляють собою масив розбитий тріщинами. При цьому породи кровлі, представлені в формі порідної балки з нерухомими шарнірними опорами або консолями, одночасно вигинаються, руйнуються і

неконтрольовано переміщуються позади очистного забію, створюючи несприятливі геомеханічні умови.

З цього випливає, що напружено-деформованний стан масиву осадочних гірських порід має вирішальне значення для вивчення стійкості кровлі та збереження гірських виробок, особливо при впливі на них тимчасових динамічних навантажень, до яких належать раптові обвалення порід основної кровлі та обвалення розшаруваних бокових порід [2].

Метою роботи є вивчення стійкості порід кровлі вугільного пласта, що лежить на широкій підатливій опорі або закладочному масиві, при впливі на них зовнішньої сили, від величини та місця прикладання якої залежить характер їх напружено-деформованного стану та стану гірських виробок.

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.** В реальних умовах розробки вугільних пластів, при різних способах управління кровлями в лаві та охорони штреків, породи кровлі вважаються балкою, збереження гірських виробок забезпечується стійкістю безпосередньої кровлі пласта як основного несучого елемента підземного спорудження. Згідно з гіпотезою балок [3] можна передбачити, що в очистному забію безпосередня та основна кровля, представлена твердими слоистими породами, деформуються та руйнуються подібно консольним балкам. Стійкість породного обвалення в призабойному просторі лави суттєво залежить від ступеня попередньої тріщинуватості кровлі, сформованої впереди очистного забію під впливом опорного тиску, а також в результаті її прогибу, коли окремі блоки розшаруваних порід працюють як шарніри [4].

В якості параметричного забезпечення геомеханічних розрахунків стійкості порід кровлі та гірських виробок, найчастіше використовують деформаційні показники, визначені статичним методом прикладання навантаження. Слід зазначити, що статичне навантаження не обмежується тим, що напруження при такому навантаженні відрізняються від динамічних навантажень [3, 5–7]. В цьому випадку бокові породи по-іншому реагують на динамічні навантаження, ніж на повільно зростаючі. Це, в певних умовах, сприяє їх руйнуванню [8–11].

На рис. 1 породи кровлі безпосередньої кровлі товщиною  $h$ , (м) розроблюваного вугільного пласта представлені в формі балки довжиною  $L$ , (м) та висотою  $h$ , (м) (рис. 1,а). В одному випадку балка має з однієї сторони жорстке закріплення, коли кут повороту  $\varphi=0$ , т.е. розглядається консольна балка (рис. 1,б), з іншої – нерухому шарнірну опору (рис. 1,в). Во всіх розглянутих випадках на вільний кінець балки прикладається зовнішня сила  $F$ , (Н) (рис. 1,б,в).

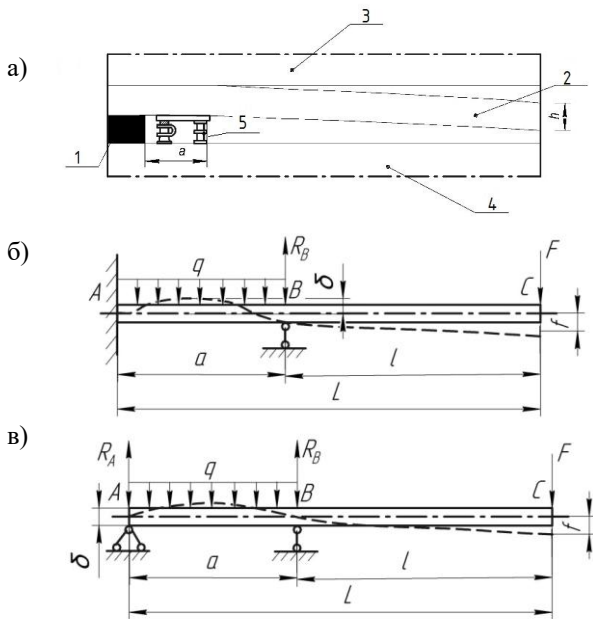


Рисунок 1 – Расчетная схема к определению устойчивости расслоившихся пород кровли разрабатываемого угольного пласта: а) общая схема взаимодействия породных слоев постоянной жесткости: 1 – угольный пласт; 2 – непосредственная кровля; 3 – основная кровля; 4 – почва; 5 – крепь в призабойном пространстве лавы; б) консольная балка; в) балка с неподвижными шарнирными опорами;  $L$  – длина балки, м;  $l$  – длина свободного конца балки, м;  $a$  – ширина призабойного пространства, м;  $f$ ,  $\delta$  – соответственно, прогиб балки в точке С и на участке АВ, м;  $q$  – равномерно распределенная нагрузка в призабойном пространстве, Н/м;  $F$  – действующая сила, Н;  $h$  – высота балки – мощность пород непосредственной кровли, м;  $R_A$ ,  $R_B$  – реакции в опорах А и В, Н

Из практики работы глубоких шахт видно, что наиболее распространенным видом проявления горного давления в очистных выработках является расслоение пород подработанной толщи и их обрушение, при достижении критических обнажений, когда в слоистых породах по мере возрастания пролета, собственный вес пород кровли выработок может проявляться весьма быстро в результате изгиба слоев [4, 12]. При ведении очистных работ в призабойном пространстве лавы происходит последовательное отделение слоев от вышележащей толщи и их прогиб по нормали к напластованию, подобно балке имеющей опоры [1, 4, 12].

Рассмотрим балку, которая имеет опоры А и В, расстояние между которыми  $a$ , (м). На участке АВ (призабойное пространство) на непосредственную кровлю действует равномерно распределенная нагрузка  $q$ , (Н/м). В точке С, в результате обрушения пород, к свободному концу балки длиной  $l$ , (м) приложена сила  $F$ , (Н) (рис. 1,б,в).

В опорах, т.е. в точках А и В (рис. 1,б, в) возникают реакции  $R_A$  и  $R_B$ , (Н), представляющие вместе с заданными нагрузками уравновешенную систему сил, действующих на такую балку. Определив опорные реакции в этих точках и установив величину

наибольшего изгибающего момента  $M_{\max}$ , (Н·м) на некотором расстоянии от точки А, изобразим эпюру для случая, когда  $a = 5$  м, а длина свободного участка балки  $l$  (м) составляет 5, 10 и 20 м соответственно (рис. 2).

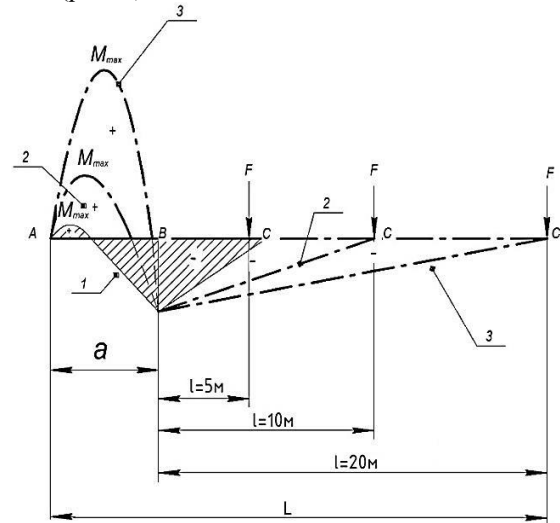


Рисунок 2 – Эпюры изгибающих моментов  $M$ , (Н·м) в породах непосредственной кровли призабойного пространства лавы шириной  $a$ , (м) при различной длине участка балки  $l$ , (м), в результате действия возмущающей силы  $F$ , (Н) в точке С:  $a = 5$  м;  $l_1 = 5$  м;  $l_2 = 10$  м;  $l_3 = 20$  м;  $M_{\max}$  – максимальное значение изгибающего момента (Н·м)

Нами установлено, что в результате действия возмущающей силы  $F$ , (Н) на свободный конец балки, в породах кровли, в пределах призабойного пространства (на участке АВ), происходит сжатие породных слоев. Причем, при определенных условиях, величина изгибающего момента тем больше, чем длиннее участок балки  $l$ , (м), расположенный позади призабойного пространства (рис. 2). Величина прогиба  $\delta$ , (м) в породах кровли в этом случае, т.е. на участке АВ (рис. 1,б,в), зависит от длины балки  $L$ , (м) и ее радиуса кривизны  $\rho$ , (м) и определяется согласно [7] по выражению

$$\delta = \frac{L^2}{8\rho}. \quad (1)$$

На рис. 3 представлены зависимости, отражающие изменение прогиба в пределах призабойного пространства, с учетом длины  $l$ , (м) свободного конца балки.

Установлено, что с увеличением длины  $l$ , (м), величина прогиба становится больше (рис. 3, зависимости 1, 2). При этом необходимо учитывать условия закрепления одного конца балки, которые оказывают существенное влияние на величину прогиба. В случае, когда один конец балки имеет неподвижную шарнирную опору, а второй – свободный, при увеличении значения  $l$ , (м) от 5 до 30 м, величина прогиба составляет  $\delta = (0,63-140) \cdot 10^{-4}$  м, (рис. 3, зависимость 1). При жестком защемлении крайнего конца балки, т.е. в точке А, исследуемая величина прогиба балки увеличивается приблизительно в два раза (рис. 3, зависимость 2). При этом, чем больше

величина изгибающего момента  $M$ , (Н·м), тем больше прогиб балки  $\delta$ , (м) на участке АВ, т.е. в пределах призабойного пространства, а, следовательно, меньше радиус ее отрицательной кривизны  $\rho$ , (м).

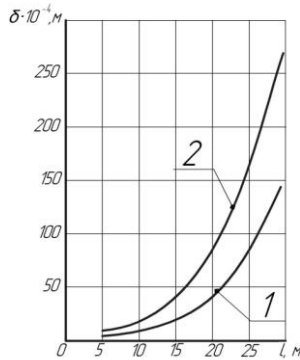


Рисунок 3 – Изменение величины прогиба  $\delta$ , (м) на участке АВ от изменения длины балки  $l$ , (м):

1 – балка с неподвижными шарнирными опорами; 2 – консольная балка

Однако Джерар и Бекер [13, 14] при изучении устойчивости сооружений и отдельных их элементов в результате динамического продольного изгиба установили, что критические напряжения в сжатых балках, подобно конструкции, изображенной на рис. 1,б,в, можно определить по выражению

$$\sigma_{кр} = \frac{4\pi E r^2}{L^2}, \quad (2)$$

где  $r$  – радиус инерции поперечного сечения балки, м;  $E$  – модуль упругости, Н/м.

Сравнивая полученные таким образом значения предельных величин напряжений с допустимыми прочностными показателями для определенного типа пород, можно сделать заключение об устойчивости рассматриваемой системы.

На рис. 4 приведена зависимость, отражающая изменение величины критических напряжений  $\sigma_{кр}$ , (МПа) в породах кровли, возникающих при сжатии балки.

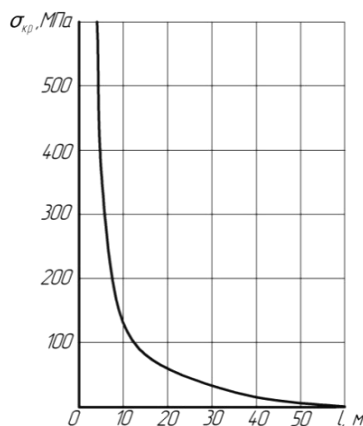


Рисунок 4 – Изменение величины критических напряжений  $\sigma_{кр}$ , (МПа) в породах непосредственной кровли – балке различной длины  $L$ , (м) в результате сжатия

Установлено, что с увеличением длины балки, когда  $L > 10$  м, величина критических сжимающих напряжений уменьшается (рис. 4). Тем не менее, используя формулу Эйлера [13], ранее нами установлено [12], что с увеличением  $L$ , (м) рассматриваемая система переходит от исходной формы равновесия к новой форме – изогнутой (рис. 1,б,в). При этом полагается, что в результате действия нагрузки, наступает такое состояние системы, когда в одно и то же время существует исходная и смежная с ней формы равновесия. В этом случае без эффективного поддержания пород кровли по всей длине балки, в рассматриваемой системе, при определенных условиях, может наступить бифуркация. Во избежание такой ситуации, рекомендуется применение закладки выработанного пространства или широких податливых полос, что гарантирует эффективное поддержание пород кровли разрабатываемого пласта позади очистного забоя и позволяет уменьшить жесткость рассматриваемой системы, а так же величину внешней силы при ударе расслоившихся пород о балку. Это достигается за счет увеличения промежутка времени между моментом приложения действующей силы и достижением максимального прогиба боковых пород разрабатываемого пласта при внезапных посадках основной кровли или обрушениях расслоившейся породной толщи [1, 4, 12]. При этом расслоившиеся породные слои со стороны кровли пласта поддерживаются податливой опорой, при минимальном ( $a = 3-5$  м) отставании которой обеспечивается их сплошность.

Известно [4, 15, 16], что внешние силы, деформируя балку, совершают работу. Эта работа переходит в потенциальную энергию деформации. Очевидно, в реальных условиях разработки угольных пластов, при разгрузке углепородного массива, ослабленного выработками, в одних случаях, деформирование и разрушение балки может происходить в результате изгиба, в других – за счет сдвига. При этом необходимо учитывать параметры породной консоли и варианты ее опирания, зависящие от способа управления горным давлением в очистном забое.

Оценим влияние потенциальной энергии деформаций сдвига  $U_G$ , (Дж) и изгиба  $U_{изг}$ , (Дж) для консольной балки, имеющей различную длину  $L$ , (м) при действии на нее возмущающей силы  $F$ , (Н) (рис. 1,б).

Согласно [7, 16, 17] потенциальную энергию деформации сдвига  $U_G$ , (Дж) консольной балки, можно определить, как

$$U_G = \int_0^l d \cdot U_G = \frac{1}{2} \int_0^l \frac{k \cdot Q}{G \cdot S} \cdot dx. \quad (3)$$

Потенциальную энергию деформации изгиба  $U_{изг}$ , (Дж) установим по выражению

$$U_{изг} = \int_0^l d \cdot U_N = \frac{1}{2} \int_0^l \frac{M^2}{E \cdot J} \cdot dx, \quad (4)$$

где  $k$  – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения касательных напряжений, в

рассматриваемом случае  $k = 1,2$  [13, 14];  $S$  – площадь поперечного сечения балки,  $m^2$ ;  $G$  – модуль сдвига, МПа.

Решая выражения (3) и (4), применительно к рассматриваемой задаче (рис. 1,б), получим

$$U_G = \frac{1}{2} \cdot \frac{k \cdot F^2}{G \cdot S} \int_0^l dx = \frac{1}{2} \cdot \frac{k \cdot F^2 \cdot L}{G \cdot b \cdot h} \quad (5)$$

$$U_{изг} = \frac{1}{2 \cdot E \cdot J_x} \int_0^l F_x^2 dx = \frac{2 \cdot F^2 \cdot L^3}{b \cdot h^3 \cdot E} \quad (6)$$

При  $k = 1,2$ ,  $\nu = 0,3$  и  $G = E/2(1+\nu)$  имеет место следующее отношение

$$\frac{U_G}{U_{изг}} = \frac{0,78h^2}{L^2} \quad (7)$$

из которого видно, что чем больше величина  $L$ , (м), т.е. длина породной балки, тем меньше отношение  $\frac{U_G}{U_{изг}}$ .

Для балки с неподвижными шарнирными опорами (рис. 1,в), отношение потенциальной энергии деформации сдвига  $U_G$ , (Дж) к деформации изгиба  $U_{изг}$ , будет иметь вид

$$\frac{U_G}{U_{изг}} = 12 \cdot \frac{E}{G} \cdot \left( \frac{J}{L^2 \cdot S} \right) \quad (8)$$

где  $J$  – момент инерции,  $m^4$ , из которого также видно, что с увеличением длины балки  $L$ , (м), отношение (8) уменьшается.

На рис. 5,а,б представлены зависимости, отражающая изменение отношения потенциальной энергии деформаций сдвига  $U_G$ , (Дж) к потенциальной энергии деформаций изгиба  $U_{изг}$ , (Дж) для балок длиной  $L$ , (м), с различными вариантами закрепления (опирания).

Во всех рассматриваемых случаях, отношение потенциальной энергии деформаций сдвига к потенциальной энергии деформаций изгиба уменьшается (рис. 5 а,б). Для консольной балки исследуемый параметр  $\frac{U_G}{U_{изг}} = 0,03$  при длине  $l = 5,0$  м уменьшает-

ся до  $\frac{U_G}{U_{изг}} = 0,0001$  при длине  $L = 60$  м (рис. 5,а).

В случае, когда балка имеет неподвижные шарнирные опоры, отношение  $\frac{U_G}{U_{изг}} = 0,21$  при длине

$l = 5,0$  м, уменьшается до  $\frac{U_G}{U_{изг}} = 0,0008$  при длине

$L = 60$  м (рис. 5,б). Очевидно то, что в результате расслоения пород кровли разрабатываемого угольного пласта, в тех случаях, когда  $L > 10$  м, учет деформаций сдвига при расчете напряженно-деформированного состояния пород кровли можно пренебречь.

Определим теперь влияние максимальных нормальных  $\sigma_{max}$  (МПа) и касательных  $\tau_{max}$ , (МПа) напряжений, возникающих в породах кровли при действии возмущающей силы  $F$ , (Н), т.е. в результате посадок основной кровли или внезапных обрушений расслоившейся толщи.

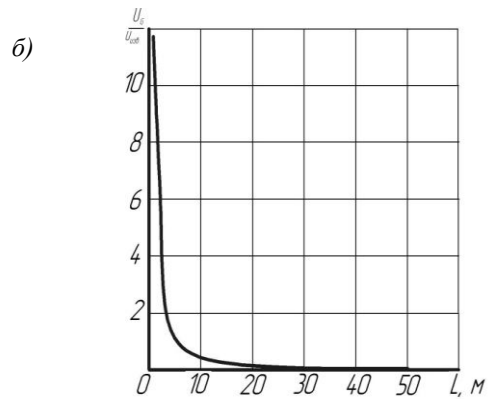
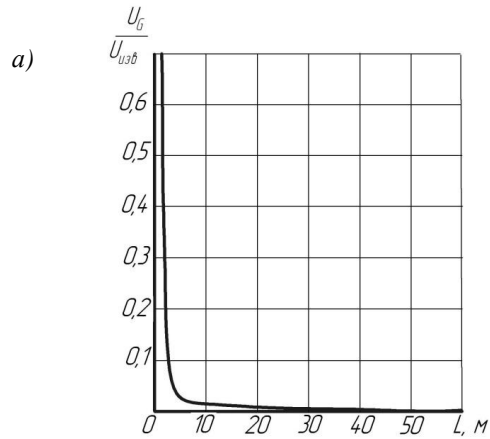


Рисунок 5 – Отношение потенциальной энергии деформации сдвига  $U_G$ , (Дж) к потенциальной энергии деформаций изгиба  $U_{изг}$ , (Дж) при действии возмущающей силы  $F$ , (Н) на балку различной длины  $L$ , (м): а) консольная балка; б) балка с неподвижными шарнирными опорами

Для консольной балки (рис. 1,б) прямоугольного сечения, максимальные нормальные напряжения можно определить как в [7]

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{W} = \frac{6Fl}{b \cdot h^2} \quad (9)$$

а максимальные касательные напряжения по выражению [7, 16]

$$\tau_{max} = \frac{3}{2} \cdot \frac{Q}{bh} = \frac{3}{2} \cdot \frac{F}{bh} \quad (10)$$

Сопоставив эти напряжения, после соответствующих преобразований получим

$$\frac{\sigma_{max}}{\tau_{max}} = \frac{6FL2bh}{bh^2 3F} = 4 \cdot \frac{L}{h} \quad (11)$$

Для балки с неподвижными шарнирными опорами, такое соотношение будет иметь вид

$$\frac{\sigma_{max}}{\tau_{max}} = \frac{L}{h} \quad (12)$$

На рис. 6 представлены зависимости, отражающие отношение максимальных нормальных  $\sigma_{max}$ , (МПа) и касательных  $\tau_{max}$ , (МПа) напряжений в поперечном сечении балки, имеющей различную длину  $L$ , (м).

Приведенные зависимости указывают на значимость главных напряжений  $\sigma_{max}$  (МПа) при расчете балок, длина которых  $L > 10$  м (рис. 6).

Исходя из вышеизложенного, прогиб балки с учетом сдвиговой податливости, при различных вариантах ее опирания (закрепления) можно определить, как в [14] по выражению

$$f_G = (1 + \alpha \cdot k) \cdot f \quad (13)$$

где  $f$  – прогиб консольной балки или балки с неподвижными шарнирными опорами, определяется как в [7];  $\alpha$  – коэффициент, зависящий от закрепления концов балки и вида нагрузки;  $\alpha=0,162-0,389$  [14];  $k$  – коэффициент, учитывающий влияние касательных напряжений.

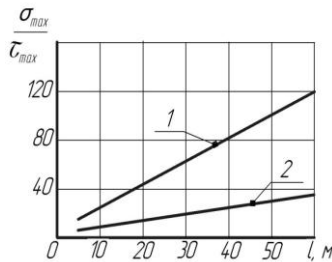


Рисунок 6 – Отношение максимальных нормальных напряжений  $\sigma_{max}$  (МПа) к максимальным касательным напряжениям  $\tau_{max}$  (МПа) в поперечном сечении балки – непосредственной кровле при ее различной длине  $L$ , (м): 1 – консольная балка; 2 – балка с неподвижными шарнирными опорами

Величина коэффициента  $k$  зависит от отношения модуля упругости пород непосредственной кровли  $E$ , (Н/м<sup>2</sup>) к модулю сдвига  $G$ , (Н/м) и определяется как в [14] по выражению

$$k = \pi^2 \cdot \frac{h_0}{l^2} \cdot \frac{E}{G}, \quad (14)$$

где  $h_0 = \frac{h}{2}$  – половина высоты сечения балки, м.

На рис. 7 представлена зависимость, отражающая изменение коэффициента  $k$  от длины балки  $L$ , (м).

Из приведенной зависимости (рис. 7) видно, что при увеличении длины балки в 6 раз, значение  $k$  уменьшается с 0,92 до 0,01. Приведенные зависимости, с учетом значений коэффициента  $\alpha$ , которые находятся в диапазоне  $\alpha = 0,162-0,389$  [14], указывают на то, что для длинных и тонких балок, у которых отношение длины балки  $L$ , (м) к мощности пород непосредственной кровли  $h$ , (м) 10:1, учет сдвиговой податливости, в определении величины прогиба пород непосредственной кровли, при анализе напряженно-деформированного состояния боковых пород, для расчета устойчивости горных выработок, можно пренебречь.

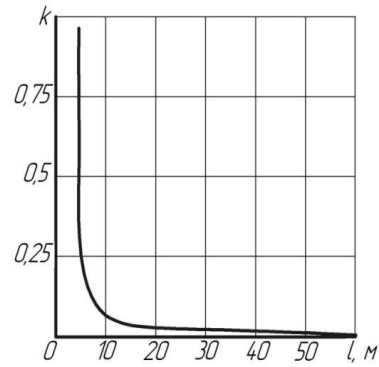


Рисунок 7 – Изменение коэффициента  $k$ , учитывающего влияние касательных напряжений при расчете балки на изгиб от ее длины  $L$ , (м):  $E = 15000$  МПа,  $G = 6000$  МПа

Таким образом, в результате проведенных нами исследований установлено, что разрушение кровли разрабатываемого угольного пласта, как основного грузонесущего элемента угленосного массива, в сложных горно-геологических условиях, происходит в конечном итоге в результате изгиба породных слоев, при достижении предельных величин обнажений. В случае применения закладки выработанного пространства или широких податливых полос, при их минимальном отставании от груди очистного забоя, в породах кровли над призабойным пространством лавы, возникают сжимающие усилия, величина которых зависит от длины балки, которая поддерживается податливой опорой, величины и места приложения внешней силы. В результате этого над горной выработкой образуется устойчивый свод, а позади нее обеспечивается плавный прогиб расслоившейся породной толщи, а рассматриваемая система является устойчивой. При этом, когда длина балки в 10 раз больше мощности расслоившихся пород кровли, при расчетах напряженно-деформированного состояния боковых пород для прогнозирования устойчивости горных выработок, усилиями сдвига можно пренебречь. Реализация различных способов охраны подготовительных выработок в сочетании с рекомендуемым способом управления горным давлением в очистном забое основана, прежде всего, на экспериментальном материале. Его анализ дает основание для применения того или иного способа в процессе отработки угольных пластов в пределах шахтного поля, отвечающего в геологическом и горнотехническом плане условиям, в которых эти способы будут наиболее эффективными. Такой подход к выбору способа охраны подготовительных выработок применяется практически на всех шахтах, как пологого, так и крутого залегания.

**ВЫВОДЫ.** Для надежной работы любой рассматриваемой системы, обеспечивающей добычу угля в сложных горно-геологических условиях, необходимо создать условия сохранения горных выработок в эксплуатационном состоянии на весь период их службы. Это достигается определенными условиями деформирования пород кровли, когда величины возникающих в ней напряжений не превыша-

ют предельных значений и боковые породы претерпевают определенного вида и уровня напряжения, зависящие от способа управления кровлей в очистном забое. Эффективное поддержание пород кровли, обеспечивается за счет применения закладки выработанного пространства или широких податливых полос, но при этом необходимо установить, прежде всего, требования к закладочному материалу или податливым опорам, т.е. рациональные параметры применяемого способа, которые позволят обеспечить плавный прогиб расслоившейся породной толщи позади очистного забоя, без нарушения сплошности слоев.

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

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Снижение травматизма от проявления горного давления / В.И. Николин, С.В. Подкопаев, А.В. Агафонов, Н.В. Малеев. Донецк: Норд-Пресс, 2005. 232 с.
2. Прочность и разрушение при кратковременных нагрузках / Х.А. Рахматулин, М.А. Шемякин, Ю.А. Демьянов, А.В. Звягин. М.: Университетская книга, Лотос, 2008. 624с.
3. Шашенко А.Н., Пустовойтенко В.П., Сдвижкова Е.А. Геомеханика: учеб. для студ. высших учеб. заведений. 2-е изд. доп. К.: Новий друк, 2016. 528 с.
4. Бирбраер А.Н., Роледер А.Ю. Экстремальные воздействия на сооружения. СПб.: Издательство Политехнического университета, 2009. 594 с.
5. Белов Н. Н., Копаница Д. Г., Югов Н. Т. Математическое моделирование динамической прочности конструкционных материалов. Т. 3. Физика ударных волн. Динамическое разрушение твердых тел. Томск: STT, 2010. 318 с.
6. Разумовский И.А. Интерференционно-оптические методы механики деформируемого твердого тела. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 240 с.
7. Тимошенко С.П., Гере Дж. Механика материалов. СПб.: Издательство «Лань», 2002. 672 с.
8. Ставрогин А.Н., Тарасов Б.Г. Экспериментальная физика и механика горных пород. – СПб.: Наука, 2001. 343 с.
9. Baruh N. Applied Dynamics. Taylor Francis Group. LLS, 2015. 872 p.
10. Kleppner D., Kolenkow R. An Introduction to Mechanics. Second Edition. Cambridge University Press, 2014. 542 p.
11. Викторов С.Д., Иофис М.А., Гончаров С.А. Сдвигание и разрушение горных пород. М.: Наука, 2005. 277 с.
12. Чепига Д.А., Иорданов И.В., Подкопаев С.В. О целесообразности применения закладки выработанного пространства при обрушении боковых пород в горную выработку. *Proceedings of the International Scientific Conference, Topical Issues of Science and Education*. Vol. 1., July 2017, Warsaw, Poland, 2017. P. 26–32.
13. Циглер Ф. Механика твердых тел и жидкостей. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика». 2002. 912 с.
14. Пановко Я.Г. Механика деформируемого твердого тела. Современные концепции, ошибки и парадоксы. М.: Наука, 1985. 288 с.
15. Subramanian R. Strength of Materials. Oxford University Press., UK., 2010. 1041 p.
16. Александров А.В., Потапов В.Д., Державин Б.П. Сопротивление материалов. М.: Высшая школа, 2003. 560 с.
17. Strauh D. Classical Mechanics : An Introduction. Springer, 2009. – 422 p.

#### ABOUT THE STRESSED-DEFORMED STATE OF SIDE ROCKS IN COMPLEX MINING-GEOLOGICAL CONDITIONS

**I. Yordanov, D. Chepiga, A. Polozhij**

Public higher education institution “Donetsk National Technical University”

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

**V. Dovgal**

State enterprise “Mirnogradugol”

vul. Vatutina, 1, Mirnograd, Donetsk region, 85322, Ukraine.

**A. Korol**

Mine enterprise “Dobropolskoe” of DTEK “Dobropolyeugol”

prosp. Shevchenko, 2, Dobropolye, Donetsk region, 85000, Ukraine.

**Purpose.** To study stability of the coal seam roof rocks which rely on a wide supple support or backing array when external forces affect them. The nature and location of the external force depends on the nature of their stress-strain state and the mine workings state. **Methodology.** A complex method using the basic provisions of the theory of elasticity, depending on the physical and mechanical properties, dimensions and shape of the girder beam as the main bearing element of underground structures has been used. **Results.** The destruction of the developed coal seam roof, as the main load-carrying element of the coal-bearing massif, in complex mining and geological conditions, ultimately results from the bending of the rock layers when the maximum rock basset values have been reached. **Originality.** As a result of applying a bookmark of the worked out space and the resulting compressive forces over the bottom hole space, a stable arch forms above the mine workings, and behind it a smooth deflection of the stratified rock strata is ensured. When the length of the beam is 5–10 times greater than the thickness of the roof stratified rocks, when calculating the stress-strain state of the side rocks to predict the stability of mine workings, shear forces can be neglected. **Practical value.** Development of measures aimed at increasing the stability of mine workings in the development of coal seams in difficult

mining and geological conditions has been carried out. **Conclusions.** In order to prevent sudden collapses of lateral rocks in the development of steep coal seams, one should be guided by the use of a universal method for controlling rock pressure and protecting mine workings has been proved. References 17, figures 7.

**Key words:** coal vein, enclosing roof-and-floor, caving, face space, socle beam, rigidly pinned knuckle-joint beam.

#### REFERENCES

1. Nikolin, V.I., Podkopaev, S.V., Agafonov, A.V., Maleev, N.V. (2005), *Snizhenie travmatizma ot projavlenij gornogo davlenija* [Injury Reduction of Rock Pressure Manifestations], Nord-Press, Donetsk, Ukraine.
2. Rahmatulin, H.A., Shemyakin, M.A., Demyanov, Yu.A., Zvyagin, A.V. (2008), *Prochnost i razrushenie pri kratkovre-mennyih nagruzkah* [Strength and Fracture under Short-term Loads], University Book; Lotus, Moscow, Russia.
3. Shashenko, A.N., Pustovoytenko, V.P., Sdvizhikova E.A. (2016), *Geomehanika* [Geomechanics], Noviy druk, Kiev, Ukraine.
4. Birbraer, A.N., Roeler, A.Yu. (2009), *Jekstremal'nye vozdeystviya na sooruzheniya* [Extreme Effects on Structures], Publishing house of Polytechnic University, St. Petersburg, Russia.
5. Belov, N.N., Kopanica, D.G., Jugov, N.T. (2010), *Matematicheskoe modelirovanie dinamicheskoy prochnosti konstrukcionnyh materialov. Tom 3. Fizika udarnykh voln. Dinamicheskoe razrushenie tverdyyh tel* [Mathematical modeling of the dynamic strength of structural materials. Vol. 3. Physics of shock waves. Dynamic destruction of solids], STT, Tomsk, Russia.
6. Razumovsky, I.A. (2007), *Interferentsionnoopticheskie metody mehaniki deformiruемого tverdogo tela* [Interference-optical methods of a deformable solid body mechanics], MSTU Bauman, Moscow, Russia.
7. Timoshenko, S.P., Gere, Dzh. (2002), *Mehanika materialov* [Mechanics of Materials], «Lan», St. Petersburg, Russia.
8. Stavrogin, A.N. (2001), *Eksperimental'naya fizika i mehanika gornyyh porod* [Experimental physics and mechanics of rocks], Nauka, St. Petersburg, Russia.
9. Baruh, H. (2015), *Applied Dynamics*, Taylor Francas Group. LLS.
10. Kleppner, D., Kolenkow, R. (2014), *An Introduction to Mechanics*, Cambridge University Press.
11. Viktorov, S.D., Iofis, M.A., Goncharov, S.A. (2005), *Sdvizhenie i razrushenie gornyyh porod* [Shift and destruction of rocks], Nauka, Moscow, Russia.
12. Chepiga, D.A., Iordanov, I.V., Podkopaev S.V. (2017), "On the expediency of applying a bookmark to the worked out space in the destruction of lateral rocks in the mine workings", *Proceedings of the International Scientific Conference, Topical Issues of Science and Education.*, Vol. 1., Warsaw, Poland.
13. Tsigler, F. (2002), *Mehanika tverdyyh tel i zhidkostey* [Mechanics of Solids and Liquids], NITs «Regulyarnaya i haoticheskaya dinamika», Izhevsk, Russia.
14. Panovko, Ya.G. (1985), *Mehanika deformiruемого tverdogo tela. Sovremennyye kontseptsii, oshibki i paradoksy* [Mechanics of a deformable solid. Modern concepts, mistakes and paradoxes], Nauka, Moscow, Russia.
15. Subramanian, R. (2010), *Sterngth of Materials*, Oxford University Press., UK.
16. Aleksandrov, A.V., Potapov, V.D., Derzhavin, B.P. (2003), *Soprotivlenie materialov* [Resistance of materials], Higher School, Moscow, Russia.
17. Strauh, D. (2009), *Classical Mechanics: An Introduction*, Springer.

Стаття надійшла 16.01.2018.