

УДК 622.834:622.862.3

## ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК В СЛОЖНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Д.А. Чепига<sup>1</sup>, И.В. Иорданов<sup>2</sup>, В.А. Коломиец<sup>3</sup>

<sup>1</sup>аспирант кафедры разработки месторождений полезных ископаемых, Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет», г. Покровск, Украина, e-mail: [daria.chepiha@donntu.edu.ua](mailto:daria.chepiha@donntu.edu.ua)

<sup>2</sup>кандидат технических наук, соискатель кафедры охраны труда, Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет», г. Покровск, Украина, e-mail: [gendir@eme.kiev.ua](mailto:gendir@eme.kiev.ua)

<sup>3</sup>инженер, директор, шахтоуправление «Южнодонбасское №1», г. Угледар, Украина, e-mail: [ugnodon1@gmail.ru](mailto:ugnodon1@gmail.ru)

**Аннотация.** В результате выполненных исследований установлено, что при разработке угольных пластов в сложных горно-геологических условиях на больших глубинах из-за расслоения пород кровли опасность возникновения аварийных ситуаций исходит от обвалов боковых пород. Закладочный массив или широкие податливые опоры, применяемые для охраны горных выработок в таких условиях, являются опорой для пород основной и непосредственной кровли в результате их расслоения и устраняют негативные явления, проявляющиеся в результате их внезапных обрушений.

*Ключевые слова:* обрушения, колебания, напряжения, оптический метод, закладочный массив.

## INVESTIGATION OF THE STABILITY OF MINE WORKINGS IN DIFFICULT MINING AND GEOLOGICAL CONDITIONS

Daria Chepiga<sup>1</sup>, Igor Iordanov<sup>2</sup>, Vladimir Kolomiets<sup>3</sup>

<sup>1</sup>postgraduate student of the Department of Mineral Deposits Development, State Higher Educational Institution "Donetsk National Technical University", Pokrovsk, Ukraine, e-mail: [daria.chepiha@donntu.edu.ua](mailto:daria.chepiha@donntu.edu.ua)

<sup>2</sup>Ph.D., competitor of the labor protection department, State Higher Educational Institution "Donetsk National Technical University", Pokrovsk, Ukraine, e-mail: [gendir@eme.kiev.ua](mailto:gendir@eme.kiev.ua)

<sup>3</sup>Engineer, director, mine management "Yuzhnodonbasskoye number 1", Ugledar, Ukraine, e-mail: [ugnodon1@gmail.ru](mailto:ugnodon1@gmail.ru)

**Abstract.** As a result of the studies carried out, it has been established that when developing coal seams in difficult mining and geological conditions at great depths due to the stratification of the roof rocks, the danger of emergencies arises from collapses of lateral rocks. The lining massif or wide flexible supports used to protect mine workings under such conditions support the rocks of the main and immediate roof as a result of their stratification and eliminate the negative phenomena manifested as a result of their sudden collapse.

*Keywords:* Caving, oscillation, stress, optical method, backfilling array.



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

Достигнутый уровень травматизма по исследуемому опасному производственному фактору (за последние 10 лет удельный вес смертельного травматизма при проведении и перекреплении выработок составляет около 32%, на сопряжении выработок – 11%) позволяет считать, что действующие меры по предотвращению обвалов и обрушений в угольной отрасли являются недостаточными. Значительное число завалов лав и подготовительных выработок связано с созданием аварийных ситуаций, которые происходили в результате нарушения горнорабочими требований ПБ при ведении горных работ по добыче угля, проведении и ремонте выработок и по неустановленным причинам.

Наиболее часто повторяющимися причинами аварий и несчастных случаев в результате обвалов и обрушений горных пород являются нарушения паспортов крепления (62%), несоответствие паспортов крепления горно-геологическим условиям (8%) и отсутствие или неисправность крепи (23%) [1]. Однако детальный анализ аварий позволяет сделать вывод о том, что во многих случаях не организационные причины, а недостаточная изученность природы обрушений и, в связи с этим, принятие ошибочных технических решений, обуславливает травматизм по рассматриваемому опасному производственному фактору. Поэтому разработка эффективных мероприятий, направленных на повышение устойчивости боковых пород и горных выработок при разработке угольных пластов, будет способствовать не только эффективной отработке запасов, но и повышению безопасности труда горнорабочих.

**Цель работы.** Для исследования устойчивости боковых пород и горных выработок при эксплуатации угольных месторождений на больших глубинах в сложных горно-геологических условиях, авторами были проведены

аналитические исследования с использованием основных положений теории колебаний и упругости и выполнено моделирование на моделях из оптически чувствительных материалов.

**Материал и результаты исследований.** Традиционно считается, что проявления горного давления в выработках зависят от совокупного влияния многих горно-геологических факторов, к которым первоначально следует относить напряженное состояние пород и их физико-механические свойства. Изучение особенностей проявления горного давления в выработках на большой глубине [2] позволило установить, что характер его опасных проявлений определяется не только напряженным состоянием массива горных пород и их физико-механическими свойствами, но и спецификой формирования последнего, обусловившей неупругое деформирование при объемном сжатии, а также способность деформироваться и разрушаться при разгрузке.

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

Для изучения проявлений природных опасностей в углепородном массиве разрабатываемого угольного пласта были приведены исследования на моделях из оптических материалов. Цель этих исследований заключалась в определении исходной качественной картины распределения касательных напряжений, при которой следует ожидать сравнительно меньших отрицательных проявлений горного давления в поддерживаемых горных выработках при различных способах их охраны и управления горным давлением в очистном забое.

Для решения поставленной задачи применялась экспериментальная установка ППУ-4, при моделировании на которой использовали известный способ сопоставления цветов и полос распределения касательных напряжений [7]. Распределение напряжений изучалось в массиве разрабатываемого угольного пласта, угол падения которого  $\alpha=60^\circ$  и  $\alpha=10^\circ$ , мощность  $m=1,0\text{м}$ , с подготовительной выработкой арочной формы. Мощность пород непосредственной кровли, в случае с крутым залеганием пласта, соответствовала 5м, а непосредственной почвы - 2м. При пологом залегании пласта, мощность пород кровли и почвы, соответствовала 3м. Длина исследуемого участка (по длине лавы) соответствовала 70м. Всего было отработано 16 моделей. Толщина моделей составляла 40 мм, а напряженное состояние создавалось пригрузом, позволяющим моделировать глубину разработки 1200м. Упругие и оптические константы моделей, критерии подобия выполнены по рекомендациям [7].

Применение оптического метода, позволило установить исходную картину распределения напряжений в среде, которая формируется во вмещающих породах в первый период времени после выемки угля. Для определения главных напряжений в модели использовали поле изоклин, представляющие собой геометрическое место точек, в которых направления главных напряжений одинаковы [7].

На рис.1 изображены изолинии главных касательных напряжений в массиве крутого угольного пласта с подготовительной выработкой при ее охране накатными кострами из шпал и способе управления кровлей в лаве удержанием на кострах (а) и охране штрека широкой податливой опорой (б). Как видно из рис.1а при способе управления кровлей удержанием на кострах, в окрестности штрека максимальная концентрация напряжений приурочена к области изгиба породных слоев. Такое положение имеет место и, в средней части лавы, когда в выработанном пространстве для удержания кровли оставляют накатные костры из шпал. Породы кровли и почвы, изгибаясь, обыгрывают эти охранные сооружения. Очевидно, имея ограниченную податливость (до 10%) и малые размеры (в натуре 2,0х2,0м) накатные костры выполняют роль опоры, в окрестности которой концентрируются напряжения. Причем, расстояния между опорами (по линии падения пласта) и их податливость (сжимаемость), определяют величину касательных напряжений в боковых породах, из-за изгиба породных слоев.

Совершенно иная исходная картина распределения напряжений в изучаемой среде, имеет место при наличии в окрестности штрека широкой податливой опоры (рис.1б). Степень ее податливости определяет вид и характер плавного изгиба вышележащих породных слоев и концентрации напряжений в них. При податливости 30-40% имеем минимальную концентрацию

напряжений в массиве. Однако, при этом, следует отметить незначительное (до 5-10%) уменьшение сечения поддерживаемого штрека, произошедшее в результате оседания пород кровли из-за податливости широкой опоры.

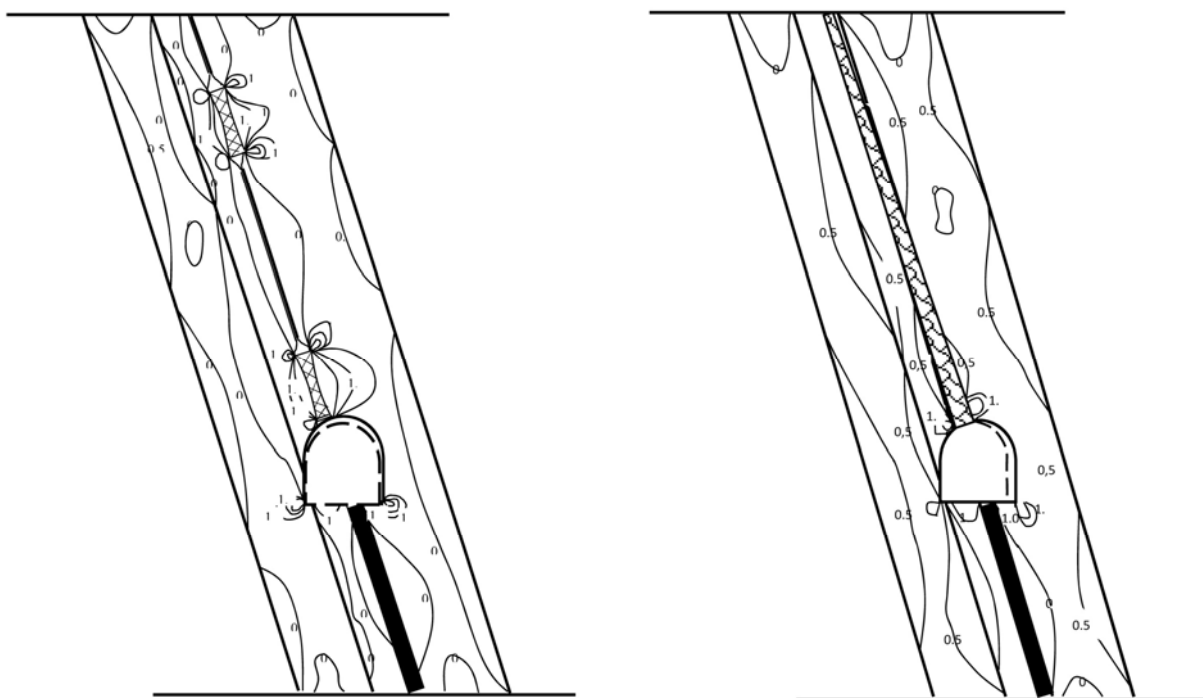


Рисунок 1 – Распределение касательных напряжений в углепородном массиве с крутым залеганием пласта ( $\alpha=60^\circ$ ) при охране подготовительной выработки накатными кострами из шпал (а) и широкой податливой опорой (б).

Такая же геомеханическая обстановка имеет место и в случае пологого залегания угольного пласта, когда выработка охраняется накатными кострами из шпал или широкой податливой опорой (рис. 2 а, б).

При использовании оптического метода, применительно к решаемой задаче, считается [8], что концентрация напряжений приводит к пластическим деформациям, а с течением времени, в местах концентрации сжимающих и растягивающих напряжений имеет место разгрузка (разрушение) осадочного массива. Подтверждением этому является анализ механических процессов, имеющих место в углепородном массиве с горной выработкой [9], когда напряженное состояние горных пород по мере удаления от контура выработки изменяется от состояния близкого к обобщенному растяжению и сдвигу, до состояния сжатия в глубине массива.

В качестве параметрического обеспечения геомеханических расчетов устойчивости боковых пород и горных выработок, наиболее часто используются деформационные показатели, определяемые статическим методом

приложения нагрузки. Однако при этом необходимо принимать во внимание ряд условий, для которых характерен динамический вид нагружения, что требует для использования в расчетах соответствующих показателей.

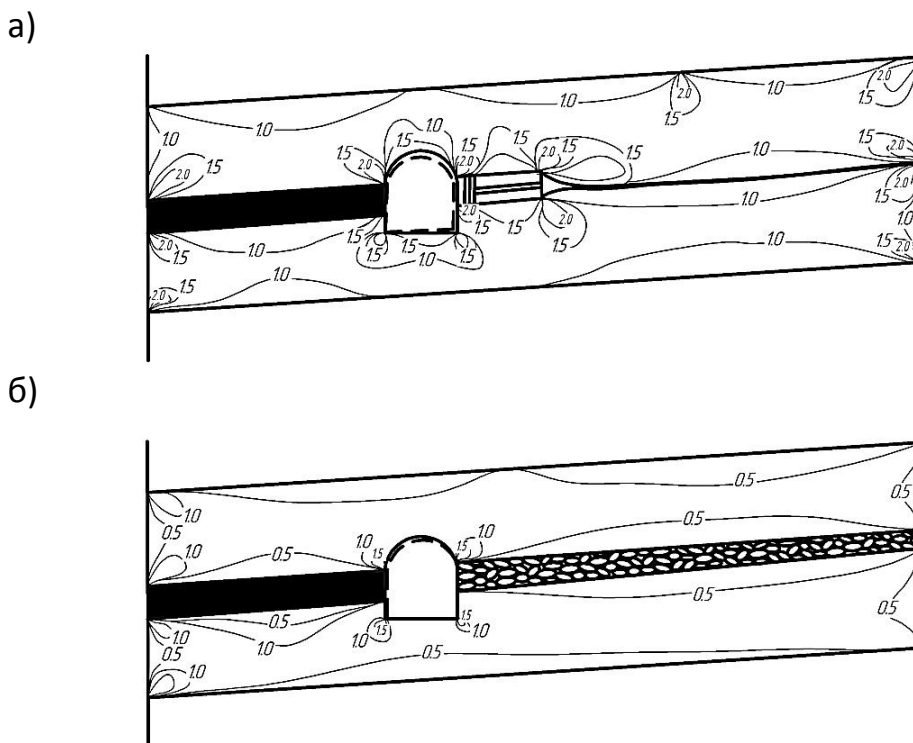


Рисунок 2 – Распределение касательных напряжений в углеродном массиве при пологом залегании пласта ( $\alpha=60^\circ$ ) с охраной накатными кострами из шпал (а) и широкой податливой опорой (б).

Следует отметить, что характерной особенностью динамических нагрузок является то, что в результате их воздействия, в нашем случае, на породы непосредственной кровли, в последних возникают колебания. Меняющаяся по величине нагрузка, имеющая место при обрушениях боковых пород, если точка ее приложения перемещается, вызывает нестационарные колебания [5].

Рассмотрим породы непосредственной кровли разрабатываемого угольного пласта в виде балки, имеющей длину  $l$ , (м). Балка имеет, в одном случае, неподвижную шарнирную опору (рис.3, а), в другом – находится на упругом основании, т.е. закладочном массиве (рис.3, б). При гармоническом возбуждении такой балки, после внезапного обрушения боковых пород, координаты точки тела для таких условий можно определить по выражениям [6]

- для балки с неподвижной шарнирной опорой

$$x = \delta_{ст.} \cdot t \cdot \sin \omega t, \quad (1)$$

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

- для балки на упругом основании

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

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

$m$  – масса балки, кг;

$m_k$  – приведенная к середине балки масса обрушившихся пород, кг.

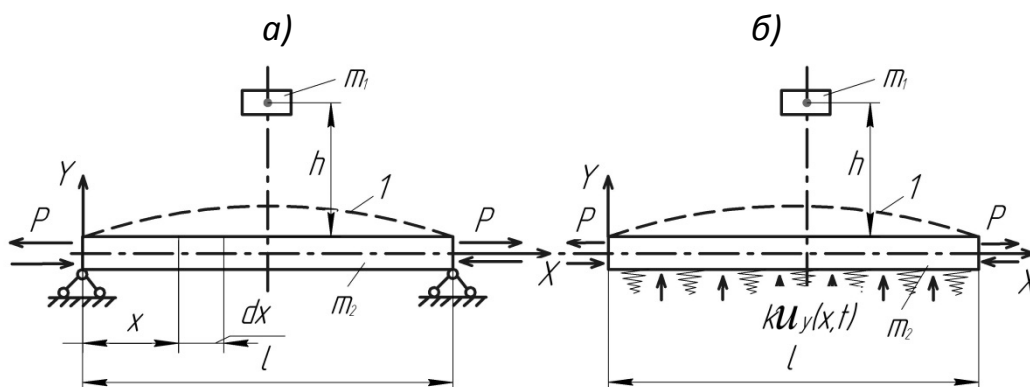


Рисунок 3 – Расчетная схема к определению колебаний балки: а) неподвижная шарнирная опора; б) упругое основание: 1 – форма колебаний,  $l$  – длина балки, (м),  $kU_y(x,y)$  – реакция упругого основания,  $P$  – приложенная сила, (Н).

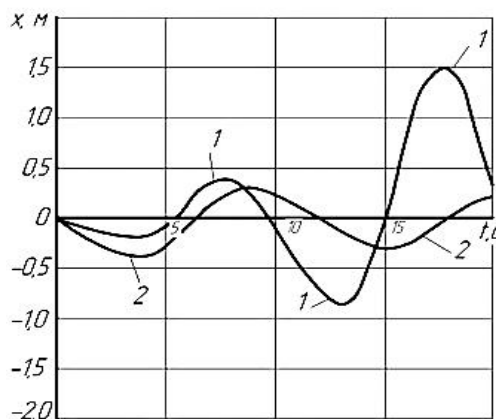


Рисунок 4 – Изменение координат точки тела при длине балки  $l=60$ м с неподвижной шарнирной опорой (1) и на упругом основании (2).

На рис.4 представлены зависимости изменения координат точки тела в результате гармонических колебаний при длине балки (породной консоли)  $l=60$ м, когда она опирается на неподвижную шарнирную опору (кривая 1) и когда находится на упругом основании (кривая 2).

Установлено, что изменение координат точек тела в случае 1 происходит плавно. Максимальные значения отклонений координат точек тела от равновесного состояния составляют  $x=1,5$ м (кривая 1) и  $x=0,4$ м (кривая 2)

(рис.4). Очевидно, балка, имеющая неподвижную шарнирную опору, находится в наиболее худших условиях, чем балка, опирающаяся на закладочный массив. Объяснить это можно откликом упругого полупространства, т.е. закладочного массива на осциллирующую силу, приложенную к рассматриваемой системе. Поэтому, при опирании пород кровли на закладочный массив, система может совершать малые колебания вблизи устойчивого положения равновесия.

Динамическое воздействие нагрузок на сооружения и конструкции, в сопротивлении материалов [6,10] производится введением динамического коэффициента в полученное решение способствующей статической задачи.

Действительно, динамические нагрузки, проявляющиеся в результате воздействия на конструкцию в виде балок различной длины, частично нейтрализуются при применении податливых опор, т.е. размещения в выработанном пространстве закладочного массива. Нами установлено, что для балок, длина которых не превышает 30м, размещение на их свободном конце податливой опоры, ослабляет эффект удара и уменьшает величину действующих в ее сечении напряжений до 30%, в сравнении с неподвижной шарнирной опорой.

Известно [3], что наиболее благоприятно 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 при его использовании исключились обрушения и внезапные осадки боковых пород.

При внезапных обрушениях расслоившихся боковых пород в горную выработку, необходимо принимать во внимание импульсивную нагрузку. Последняя отличается от обычной нагрузки, прежде всего, внезапностью ее приложения и кратковременностью действия.

В результате решения такой задачи [11], нами было установлено, что при внезапном обрушении боковых пород в результате соударения твердых тел, когда расслоившиеся породы ударяются о непосредственную кровлю – балку, длина которой более  $l > 20\text{м}$ , величина ударного импульса при этом не изменяется при постоянных значениях боковых пород и, в таких условиях, не зависит от массы ударяемого тела.

Причем, при соударении тел в центральной части балки возникающий ударный импульс в полном объеме передается на неподвижную шарнирную опору. Очевидно, параметры балки (породной консоли) и величина ударной силы, проявляющаяся в месте контакта обрушившихся пород по длине балки в комплексе, оказывают существенное влияние на состояние боковых пород.



Для надежной работы рассматриваемой системы, т.е. эксплуатационного состояния горной выработки, необходимо, чтобы все ее элементы были устойчивы. Это достигается определенными условиями деформирования балки, когда величины возникающих в ее сечении напряжений не превышают предельных значений. Применительно к породам непосредственной кровли разрабатываемых угольных пластов, последние должны деформироваться в установленных пределах, когда выполняются соответствующие условия прочности для определённого типа пород. Величину критических напряжений для таких условий, определяют исходя из формулы Эйлера [10].

Однако ее применение имеет ряд ограничений. Эти ограничения, прежде всего, учитывают момент потери устойчивости балки, когда действующие в любом ее сечении напряжения не превышают предела пропорциональности. В тех случаях, когда такие условия не выполняются, разрушение балок будет происходить от действующих изгибных напряжений.

Для таких условий пределы применимости формулы Эйлера, можно установить исходя из понятия предельной гибкости балки, когда

$$\lambda_{пр} = \pi \sqrt{\frac{E}{[\sigma_{изг}]}} \quad (3)$$

где  $[\sigma_{изг}]$  – предел прочности пород непосредственной кровли на изгиб, Н/м<sup>2</sup>; E – модуль упругости пород непосредственной кровли, Н/м<sup>2</sup>.

Предельная гибкость балки зависит от физико-механических свойств пород непосредственной кровли. С учетом этого, формула Эйлера дает истинное значение нагрузки, при которой происходит потеря устойчивости балки, т.е.

$$\sigma_{доп.} = \frac{\pi^2 E}{\lambda} \quad (4)$$

Учитывая динамические критерии разрушения боковых пород, напряжения, возникающие в балке при соударении в результате внезапных обрушений боковых пород, можно определить как

$$\sigma = v \cdot \cos \alpha \sqrt{\frac{E \cdot \rho}{2}} \quad (5)$$

где  $v$  – значение скорости при ударе, м/с;  $\alpha$  – угол падения пласта, град;  $\rho$  – плотность пород непосредственной кровли, Н/м<sup>3</sup>.

С использованием зависимостей (4) и (5) получена корреляция величины напряжений в породах непосредственной кровли – балки с учетом вариации ее гибкости и скорости соударения твердых тел (рис.5 а,б).

Приведенные обусловленности (рис.5 а,б) дают значения нагрузок, при которых происходит потеря устойчивости пород непосредственной кровли. Установлено, что при расчете на устойчивость балки при внезапном обрушении на нее боковых пород, критическая нагрузка всегда подобна разрушающей при расчете кровли на изгиб. Напряжения в ударяемом теле,

с учетом скоростей соударения более 15-30 м/с, могут изменить механические характеристики пород кровли. Очевидно, за пределами условной зоны (зона А, рис.5 а,б), находится область неустойчивого состояния пород. По сути, в этой области, с момента наступления критического состояния и до момента разрушения, деформации пород кровли нарастают крайне быстро. Во многих случаях изменение может быть настолько существенным, что будет оказывать влияние на природу самого разрушения. В связи с этим, представляет определённый интерес исследования изменения величины модуля Юнга для различного вида динамических нагрузок.

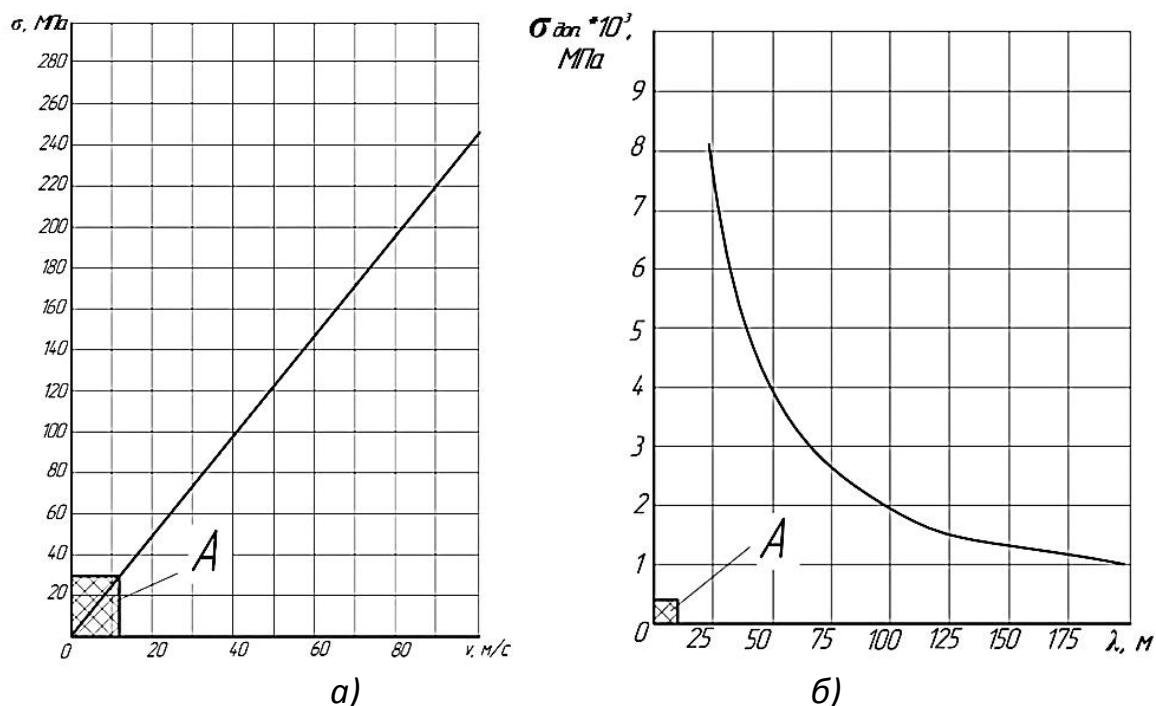


Рисунок 5 – Изменение величины напряжений в породах кровли ( $\sigma$ , МПа) с учетом вариации: а) гибкости ( $\lambda_{пр}$ ); б) скорости соударения твердых тел ( $v$ , м/с); А – зона устойчивого состояния боковых пород.

Таким образом, при разработке угольных пластов на больших глубинах в результате расслоения боковых пород, опасность возникновения аварийных ситуаций исходит от обвалов и обрушений пород кровли. При определенных параметрах породной консоли и отсутствии эффективного подпора со стороны выработанного пространства, в результате динамического (ударного) воздействия вероятность завала горных выработок возрастает. Применение закладки выработанного пространства или широких податливых полос со стороны выработанного пространства, позволит существенно изменить геомеханическую обстановку. Закладочный массив или податливые опоры, на которые опираются породы непосредственной и основной

кровли в результате их расслоения, устраняют негативные явления, проявляющиеся при внезапных обрушениях боковых пород.

**Вывод.** В сложных горно-геологических условиях разработки угольных пластов Донбасса с учетом установленной динамики боковых пород при их внезапном обрушении, необходимо ориентироваться на способ управления кровлей закладкой выработанного пространства или на применение широких податливых полос. Последние должны размещаться в выработанном пространстве позади очистного забоя. Закладочный массив или податливые опоры, на которые опираются породы непосредственной кровли в массиве при внезапных обрушениях боковых пород, что позволит снизить уровень травматизма горнорабочих от обвалов и обрушений.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Левкин Н.Б. Предотвращение аварий и травматизма в угольных шахтах Украины // Н.Б. Левкин / Монография. – Донецк: Донбасс, 2002. – 393 с.
2. Николин И.В. Снижение травматизма от проявлений горного давления / И.В. Николин, С.В. Подкопаев, А.В. Агафоноф. – Донецк: Норд-Пресс. 2005. – 232 с.
3. Андрушко В.Ф. Управление кровлей в сложных горно-геологических условиях / В.Ф. Андрушко, С.А. Саракитянец, Ю.Г. Спицын. – К.: Техника, 1985. – 128 с.
4. Авершин С.Г. Сдвигение горных пород при подземных разработках / С.Г. Авершин – М.: Углетехиздат, 1947. – 208с.
5. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара / Я.Г. Пановко – Л.: Машиностроение, 1976. – 320 с.
6. Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле. / С.П. Тимошенко, Д.Х. Янг, У. Унвер. – М.: Машиностроение, 1985. – 472 с.
7. Методические указания по изготовлению моделей из оптически чувствительных материалов для исследования проявлений горного давления. – Л.: ВНИМИ, 1970. – 180 с.
8. Баклашов И.В. Деформируемость и разрушение породных массивов / И.В. Баклашов – М.: Недра, 1988. – 271 с.
9. Норель Б.К. Изменение механической прочности угольного пласта в массиве / Б.К. Норель – М.: Наука, 1983. – 201 с.
10. Циглер Ф. Механика твердых тел и жидкостей / Ф.Циглер – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика». 2002. – 912 с.
11. Подкопаев С.В. О динамических нагрузках при внезапных обрушениях боковых пород / С.В. Подкопаев, И.В. Иорданов, Д.А. Чепига // Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва – Наукововиробничий журнал: Кременчуцький нац. ун-т ім. М.Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2016. – Вип.2(18). – С. 99-112