

О ПРОГНОЗИРОВАНИИ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКАТОЧНЫХ ШТРЕКОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ ОХРАНЫ В ГЛУБОКИХ ШАХТАХ

Цель. Прогнозирование устойчивости откаточных штреков с использованием усовершенствованной математической модели пластовой подготовительной выработки, позволяющей оценить изменение ее поперечного сечения при различных способах охраны, в условиях глубоких шахт, разрабатывающих угольные пласты наклонного или крутого залегания.

Методы. В исследованиях используется комплексный подход, включающий анализ и обобщение теоретических исследований по прогнозированию устойчивости подготовительных выработок и усовершенствование математической модели пластовой подготовительной выработки, позволяющей оценить потери площади поперечного сечения эксплуатируемого откаточного штрека при различных способах охраны.

Результаты. Рассматривая устойчивость пластовой подготовительной выработки, как ее способность сохранять заданные размеры и форму в течение всего срока эксплуатации, для типовых условий разработки угольных пластов украинского Донбасса установлено, что использование податливых охранных сооружений, возводимых над штреком, обеспечивает минимальные потери его поперечного сечения по длине (позади очистного забоя) в сравнении с охраной выработки хрупкими сооружениями. При построении модели, позволяющей оценить потери поперечного сечения пластовых откаточных штреков при различных способах охраны, помимо основных влияющих факторов (глубина горных работ, мощность разрабатываемого угольного пласта, физико-механические свойства боковых пород), учитывается и изменение жесткости охранных сооружений по длине поддерживаемой выработки.

Научная новизна. Использование интерполяционных сплайнов, как инструмента геометрического моделирования, для прогнозирования устойчивости пластовых подготовительных выработок, с учетом изменения жесткости охранных сооружений на протяжении откаточного штрека, в условиях наклонного и крутого залегания угольных пластов.

Практическая значимость. Приведены рекомендации по прогнозированию устойчивости откаточных штреков, с учетом применяемых, в конкретных горно-геологических условиях, способов охраны. Отмечается, что для обеспечения эксплуатационного состояния пластовых подготовительных выработок, позади очистного забоя, в условиях глубоких шахт, необходимо ориентироваться на применение податливых охранных сооружений, которые обеспечивают достаточный подпор оседающей породной толще позади очистного забоя.

Ключевые слова: математическая модель, сечение, потери, горное давление, штрек.

Введение.

Опыт работы шахт украинского Донбасса показывает, что с ростом глубины разработки угольных пластов, в массиве осадочных горных пород начинает проявляться такой негативный фактор, как расслоение боковых пород, оказывающий существенное влияние на состояние выработок. Применяемые в настоящее время способы охраны пластовых подготовительных выработок, являясь результативными в конкретных условиях, теряют свою эффективность при изменении горно-геологических условий, что способствует созданию аварийных ситуаций.

Общеизвестно, что неудовлетворительное состояние горных выработок повышает уровень травматизма горнорабочих, особенно при поддержании откаточных штреков в условиях наклонного и крутого залегания пластов. В силу специфических особенностей разработки угольных пластов, связанных с углами их

падения, в таких условиях имеет место опасность обрушений и обвалов пород кровли и, как следствие этого, завалов горных выработок. В одних случаях обрушения боковых пород распространяются на призабойное пространство лавы, нередко по всей ее длине и сопровождаются частичным или полным завалом очистного забоя и откаточного штрека. В других случаях, эти явления происходят за лавой и приводят только к завалу пластовых подготовительных выработок. Однако во всех рассмотренных ситуациях, имеет место потеря регламентированного Правилами безопасности сечения штреков, что в свою очередь способствует увеличению уровня травматизма на протяжении горных выработок.

Проведение полевых участковых выработок облегчает условия их поддержания по сравнению с пластовыми, но при этом конструктивно усложняется система разработки пластов и увеличивается

относительный объём проводимых участковых выработок. В связи с тем, что работы по поддержанию и перекреплению штреков, как правило, выполняются вручную и, в обозримой перспективе, не имеют решений по их механизации, целесообразно использовать модели, позволяющие прогнозировать устойчивость штреков, для выбора эффективного способа их охраны в конкретных горно-геологических условиях разработки угольных пластов.

Анализ исследований и публикаций.

Эффективность отработки угольных пластов и безопасность ведения горных работ на шахтах, в значительной степени зависит от способа управления кровлей в лаве и охраны подготовительных выработок. Как показало изучение процесса сдвижений и деформаций осадочных горных пород [1], при выемке угольных пластов в нарушенной толще происходит образование характерных зон сдвижения, на динамику и размеры которых в значительной степени влияет способ управления кровлей в лаве.

По мере выемки угля, подработанные породы кровли, оседающие на хаотически обрушенные слои расслоившейся толщи, представляют собой блочный массив, состоящий из балок различной длины. Причем породы кровли изгибаются, неконтролируемо оседают позади очистного забоя, создавая неблагоприятную геомеханическую обстановку в окрестности поддерживаемых горных выработок [2,3]. Установлено [4], что в зависимости от горно-геологических условий, зона расслоения боковых пород составляет по нормали к напластованию 4-5м. Негативные последствия такой геомеханической обстановки могут проявляться в том, что кровля разрабатываемого пласта, не имея достаточного подпора в выработанном пространстве, внезапно обрушается, что и способствует потери площади поперечного сечения штрека и завалу горных выработок [5, 17].

С использованием ранее построенных моделей [21,22,23], в частности, имитационной модели для расчета устойчивости подземной горной выработки, было установлено, что с увеличением глубины ее заложения до 1000-1200 м, затраты на поддержание устойчивости будут возрастать пропорционально глубине [21].

Изучение процесса и определение величины смещений боковых пород на контуре пластовых подготовительных выработок, прогнозирование потерь площади поперечного сечения при различных способах охраны, позволит разработать мероприятия, направленные на сохранность горных выработок в эксплуатационном состоянии и повысить безопасность труда горнорабочих.

Цель исследований.

Прогнозирование устойчивости откаточных штреков с использованием усовершенствованной математической модели пластовой подготовительной выработки, позволяющей оценить изменение ее поперечного сечения при различных способах охраны, в условиях глубоких шахт, разрабатывающих угольные пласты наклонного или крутого залегания.

Методы исследований.

В исследованиях используется комплексный подход, включающий анализ и обобщение теоретических исследований по прогнозированию устойчивости подготовительных выработок и усовершенствование математической модели пластовой подготовительной выработки, с применением интерполяционных сплайнов, позволяющей оценить потери площади поперечного сечения эксплуатируемого откаточного штрека при различных способах охраны.

В связи с этим, в качестве основного объекта исследований принято исследование изменения площади поперечного сечения откаточного штрека по его длине позади лавы, а для количественной оценки – использование величины смещений пород кровли в выработке и изменение жесткости охранных сооружений, в зависимости от способа охраны и расстояния от очистного забоя.

Изложение основного материала.

Одной из проблем подземной разработки наклонных и крутых угольных пластов, является сохранение в эксплуатационном состоянии пластовых откаточных штреков позади лавы, с возможностью их повторного использования. Для этого возникает необходимость в установлении вида

функциональной зависимости, позволяющей прогнозировать смещения боковых пород на контуре штрека по его длине. Ранее было установлено [6, 7], что наибольшие величины смещений в выработке имеют место со стороны кровли разрабатываемого угольного пласта, по линии, перпендикулярной напластованию пород.

При проведении экспериментальных исследований устойчивости пластовых подготовительных выработок при различных способах охраны, в условиях шахт «Центральная» и «Торецкая» ГП «Торецкуголь» при разработке пласта l_3 Мазурка, было установлено, что основными величинами, характеризующими поведение кровли угольного пласта на всем протяжении эксплуатируемой подготовительной выработки, позади очистного забоя, являются: удельный вес пород γ , н/м³; глубина разработки H , м; мощность угольного пласта m , м; модуль упругости пород кровли E , Н/м²; предел прочности пород кровли на изгиб $\sigma_{изг.}$, Н/м²; площадь поперечного сечения выработки S , м²; скорость подвигания очистного забоя v , м/с, которые можно представить зависимостью

$$U_{кр.} = \varphi(\gamma, H, m, E, \sigma_{изг.}, S, v) \quad (1)$$

Используя теорему Букингема [8], перечисленные в (1) переменные, можно выразить через соотношение

$$L^1 = [(L^{-2}MT^{-2})^a, (L_1)^b, (L_1)^c, (L^{-1}MT^{-2})^d, (L^{-1}MT^{-2})^e, (L^2)^f, (LT^{-1})^g] \quad (2)$$

После объединения членов с одинаковыми показателями, получают безразмерные комбинации

$$\left(\frac{U_{кр.}}{H}\right)^1 = \left(\frac{E}{\gamma H}\right)^d \cdot \left(\frac{\gamma H}{\sigma_{изг.}}\right)^e \cdot \left(\frac{m}{H}\right)^c \cdot \left(\frac{S}{H^2}\right)^f \quad (3)$$

которые дозволительно показать в виде зависимости, позволяющей определить смещения пород кровли в откаточном штреке

$$U_{кр.}^p = \frac{\gamma H m}{\sigma_{изг.}} \quad (4)$$

При всем том, эксперименты, проведенные в условиях шахт ГП «Торецкуголь» дают функцию

$$U_{кр.}^p = k_0 \frac{\gamma H m}{\sigma_{изг.}}, \quad (5)$$

в которой величина k_0 является коэффициентом, зависящим от принятого способа охраны эксплуатируемых откаточных штреков. Следует отметить, что в выражении (5) для различных способов охраны штреков, этот коэффициент принимает различные значения: когда $k_0 = 0,2$ – это соответствует применению податливых средств охраны; $k_0 = 0,3-0,35$ – использованию целиков угля.

Для того чтобы учесть смещения пород кровли на контуре откаточного штрека в зоне установившегося горного давления, но с учетом изменения жесткости охранных сооружений по длине поддерживаемой выработки, необходимо определить вид функциональной зависимости, выполняющей роль ограничивающего фактора на параметр протяженности штрека l , (м) позади очистного забоя. Очевидно, самый простой вид такой зависимости для рассматриваемого участка, это штрафная функция в виде

$$y = k_{\Pi} \frac{1}{100}, \quad (6)$$

где l – протяженность штрека, м;

k_{Π} – коэффициент, учитывающий изменение жесткости охранных сооружений.

Значения коэффициента k_{Π} были определены при отработке экспериментальных данных, полученных в условиях шахт «Центральная» и «Торецкая» ГП «Торецкуголь» [7] в виде зависимостей, изображенных на рис. 1 а,б.

Основная задача метода штрафных функций состоит в преобразовании задачи минимизации функции $U_{кр.}$, с

соответствующими ограничениями [18,19,20]. В рассматриваемом случае необходимо, чтобы при нарушении ограничений, установленная функция (6) «штрафовала» функцию $U_{кр.}$, т.е. изменяла ее значение.

С учетом вышеизложенного, выражение для прогнозирования смещений пород кровли в откаточном штреке позади очистного забоя, можно представить как функциональную зависимость, имеющую вид

$$U_{кр.}^p. = k_0 \frac{\gamma \cdot H \cdot m}{\sigma_{изг.}} + k_{\Pi} \frac{l}{100}. \quad (7)$$

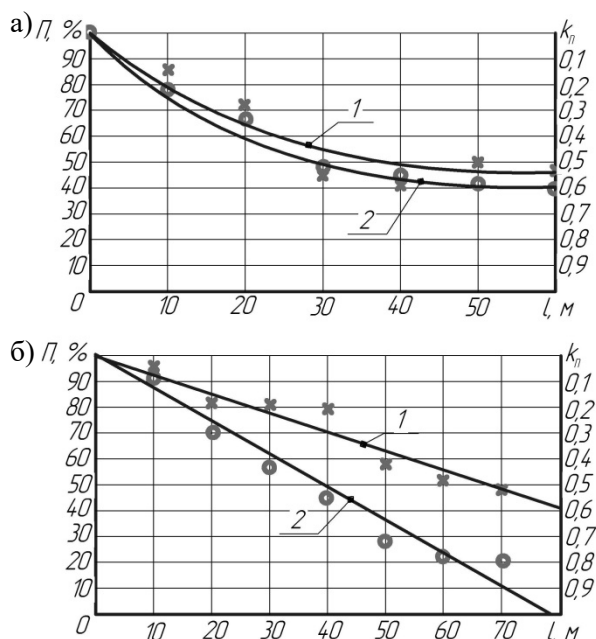


Рис.1. Изменение жесткости охранных сооружений Π , % и коэффициента k_{Π} по длине откаточного штрека: а) при охране деревянными конструкциями; б) целиками угля: 1 – шахта «Торецкая», глубина горных работ $H=810$ м, угол падения пласта $\alpha=29^\circ$, 2 – шахта Центральная, глубина горных работ $H=1146$ м, угол падения пласта $\alpha=59^\circ$

В выражении (7), в случае использования для охраны штреков податливых сооружений, смещения пород кровли принимают максимальные значения при $l=40$ м и далее, не увеличиваются, т.е. $l=l_{\max}=40$ м

Анализ шахтных инструментальных наблюдений показывает [6,7], что по мере подвигания очистного забоя, активизируются смещения пород на контуре пластовой подготовительной выработки и, в конечном итоге, происходит деформирование арочной податливой крепи и, соответственно, изменение площади поперечного сечения. Так как существует

корреляция между величиной смещения пород на контуре выработки и изменением площади поперечного сечения, возникает необходимость в определении количественной оценки исследуемой величины, в виде зависимости, позволяющей оценить устойчивость пластовых подготовительных выработок, при различных способах охраны.

Очевидно, как было установлено ранее [23], такую зависимость можно получить, если известна форма арочной крепи после деформации хотя бы в нескольких характерных точках. Для того, чтобы оценить потери площади поперечного сечения откаточного штрека при различных способах охраны с учетом изменения жесткости охранных сооружений и установить форму крепи после деформации, была усовершенствована математическая модель пластовой подготовительной выработки (рис.2). В данной модели для установления формы контура выработки после деформации, определяются опорные точки. Такими точками являются т.1 и т.4. (рис.2 а), находящиеся на краях криволинейной части арки, причем т.4, находящаяся со стороны почвы пласта не будет перемещаться при деформации арочной крепи, т.е. она является неподвижной. Координаты т.3 определяются пересечением криволинейной части арочной крепи, с линией ограничивающей почву пласта. Еще одна опорная точка, т.2, характеризующая конфигурацию деформированной арочной крепи, находится на пересечении криволинейной части арочной крепи и линии проходящей через т.5 и перпендикулярной линиям, ограничивающим кровлю и почву разрабатываемого пласта, т.е. перпендикулярную напластованию пород. Математическая постановка рассматриваемой задачи в таком виде, позволяет определить координаты точек, являющихся характерными для деформированного состояния арочной крепи (рис.2 б). Исходными данными для решения такой задачи являются следующие величины: ширина выработки b , м; высота прямолинейной части арки h , м; угол падения разрабатываемого угольного пласта α , град; мощность пласта m , м и величина смещения пород кровли $U_{кр.}$, м. Причем, последний параметр определяется по выражению (7).

Рассмотрим алгоритм решения задачи. Вводим декартову систему координат, начало которой совпадает с левым нижним углом арочной крепи. Направим ось X вдоль основания крепи, а ось Y вдоль линии, ограничивающей арочную крепь слева. Линия, ограничивающая арочную крепь сверху в недеформированном состоянии представляет собой полуокружность (кривая 1, рис.2 б). Уравнение этой окружности, центр которой находится в т.6 с координатами $\left(\frac{b}{2}, h\right)$, запишем в виде

$$(y-h)^2 + \left(x - \frac{b}{2}\right)^2 = \frac{b^2}{4}. \quad (8)$$

Уравнение линии, определяющей кровлю пласта (кривая 2, рис. 2 б) имеет вид

$$y = \operatorname{tg} \alpha \cdot x \quad (9)$$

Уравнение линии, определяющей почву пласта (кривая 3, рис. 2 б), определяется как

$$y = \operatorname{tg} \alpha \cdot x - \frac{m}{\cos \alpha} \quad (10)$$

Уравнение линии, (кривая 4) проходящей через точку 5 с координатами $(b, 0)$ и перпендикулярную линиям, описанных уравнениями (9) и (10) можно представить в виде зависимости

$$y = -\operatorname{ctg} \alpha \cdot x + b \quad (11)$$

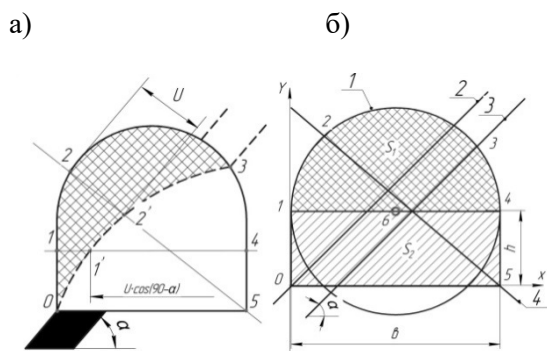


Рис.2. Модель для прогнозирования изменения площади поперечного сечения откатного штрека: а) конфигурация контура выработки; б) математическая модель: 0, 1, 2, 3, 4, 5 – опорные точки.

Определим начальные координаты точки 1: $x_1=0$; $y_1=h$.

Для определения начальных координат т.2 решается система уравнений, состоящая из зависимостей (8) и (11)

$$\begin{cases} y = \sqrt{\frac{b^2}{4} - \left(x - \frac{b}{2}\right)^2} + h, \\ y = -\operatorname{ctg} \alpha \cdot x + b. \end{cases} \quad (12)$$

Поскольку,

$$\sqrt{\frac{b^2}{4} - \left(x - \frac{b}{2}\right)^2} = -\operatorname{ctg} \alpha \cdot x + b - h \quad (13)$$

то после преобразования получается квадратное уравнение вида:

$$x^2(1 + \operatorname{ctg}^2 \alpha) + x(2h \operatorname{ctg} \alpha - 2b \operatorname{ctg} \alpha - b) + (h - b)^2 = 0.$$

Решением этого уравнения будут два корня

$$x_{1,2} = \frac{2 \cdot b \operatorname{ctg} \alpha + b - 2h \cdot \operatorname{ctg} \alpha \pm \sqrt{D}}{2 \cdot (1 + \operatorname{ctg}^2 \alpha)},$$

где:

$$D = (2h \cdot \operatorname{ctg} \alpha - 2b \cdot \operatorname{ctg} \alpha - b)^2 - 4(1 + \operatorname{ctg}^2 \alpha) \cdot (h - b)^2$$

Исходя из физического смысла задачи, за начальные координаты т.2 выбираем

$$x_2 = \min(x_{k1}, x_{k2}),$$

тогда,

$$y_2 = -\operatorname{ctg} \alpha \cdot x_2 + b.$$

Начальные координаты т.3 получаются из системы уравнений (8) и (10).

$$\begin{cases} y = \sqrt{\frac{b^2}{4} - \left(x - \frac{b}{2}\right)^2} + h, \\ y = \operatorname{tg} \alpha \cdot x - \frac{m}{\cos \alpha}. \end{cases}$$

когда

$$\sqrt{\frac{b^2}{4} - \left(x - \frac{b}{2}\right)^2} = \operatorname{tg} \alpha \cdot x - \frac{m}{\cos \alpha} - h.$$

После преобразования получим квадратное уравнение

$$x^2 \left(1 + \operatorname{tg}^2 \alpha \right) + x \left(-\frac{2 \operatorname{tg} \alpha \cdot m}{\cos \alpha} - 2h \cdot \operatorname{tg} \alpha - b \right) + \left(h + \frac{m}{\cos \alpha} \right) = 0.$$

Решением этого уравнения будут два корня

$$x_{1,2} = \frac{2h \cdot \operatorname{tg} \alpha + b + \frac{2 \operatorname{tg} \alpha \cdot m}{\cos \alpha} \pm \sqrt{D}}{2 \left(1 + \operatorname{tg}^2 \alpha \right)}$$

$$\text{где: } D = \left(-\frac{2 \operatorname{tg} \alpha \cdot m}{\cos \alpha} - 2h \cdot \operatorname{tg} \alpha - b \right)^2 - 4 \left(1 + \operatorname{tg}^2 \alpha \right) \cdot \left(h + \frac{m}{\cos \alpha} \right),$$

а координатами т.3

$$x_3 = \max(x_{k_1}, x_{k_2}),$$

$$y_3 = \operatorname{tg} \alpha \cdot x_3 - \frac{m}{\cos \alpha}.$$

Начальные координаты т.4: $x_4=b$; $y_4=h$.

После деформирования арочной крепи т.1 и т.2 (рис.1а) переходят в новое положение 1' и 2'. Определяем координаты этих точек.

- точка 1'

$$x_1' = U \cdot \sin \alpha,$$

$$y_1' = h.$$

- точка 2'

$$x_2' = x_2 + U \cdot \cos \alpha,$$

$$y_1' = y_2 - U \cdot \sin \alpha.$$

Следовательно, проведенные расчеты позволили определить координаты точек 1, 2, 3 и 4, являющихся опорными для деформированного состояния арочной крепи.

Однако, для использования численных методов, позволяющих с необходимой точностью определить уравнение кривой, позволяющей установить изменение поперечного сечения откаточного штрека, этого недостаточно. Возникает необходимость в решении задачи, когда для некоторого множества аргументов x , в нашем случае x_1, x_2, x_3, x_4 известны значения функции $f(x_1), f(x_2), f(x_3), f(x_4)$ и необходимо определить значения функции для промежуточных значений аргументов [9,10,11].

В данном случае, необходимо построить функцию $\varphi(x)$, достаточно простую для вычислений, которая в заданных точках x_1, x_2, x_3, x_4 будет принимать значения $f(x_1), f(x_2), f(x_3), f(x_4)$, а в остальных точках отрезка, принадлежащего области определения $f(x)$, приближенно представлять функцию $\varphi(x)$ с определенной степенью точности. Такая задача называется задачей интерполирования [12,13,14].

После того, как определены значения функции, описывающей положение деформированной арочной крепи, расположенной выше линии 1-4, для промежуточных значений аргументов, выбранных в нужном количестве и с определенным шагом, возникает необходимость непосредственного определения вида уравнения деформированной крепи, по которому можно определить площадь поперечного сечения выработки, расположенную выше линии, соединяющей точки 1-4.

Исходя из этого, задача определения площади поперечного сечения верхней части выработки состоит из трех этапов:

- использование интерполяционных формул позволяющих определить значения функции в промежуточных значениях аргументов.

- по вычисленным дополнительным точкам, с помощью наилучшего среднеквадратичного приближения, определяется вид функции, описывающий деформированную арочную крепь до линии 1-4.

- используя аппарат интегрального исчисления, определить площадь поперечного сечения верхней части выработки S_1 .

Представив интерполяционный сплайн в виде линейной комбинации В-сплайнов [15,16], когда

$$B_{m,i}(x), \quad i = -m; -m+1; \dots; N-1,$$

порядка m по разбиению

$$x_{-m} < x_{-m+1} < \dots < x_{-1} < x_0 < \dots < x_{N-1} < \dots < x_{N+m},$$

с носителями

$$[x_i, x_{i+m+1}],$$

для отыскания его коэффициентов получим систему линейных уравнений с неотрицательной ленточной матрицей.

Рассматриваемый метод заключается в замене исходных данных x на близкие данные \bar{X} и (или) замене оператора на близкий оператор A , так, чтобы приближенное к точному решению U значение $\bar{y} = A(\bar{x})$ легко вычислялось.

Близость двух функций, искомой и используемой, можно определить разными способами. Эти вопросы рассматриваются в функциональном анализе, некоторые понятия которого используются при доказательстве сходимости приближенного оператора к точному решению рассматриваемой задачи [9].

Выбирая метрические пространства, т.е. выбирая множества X , U и определяя в них метрики, условно считается, в каких классах функций можно выбирать начальные данные и определять решение. В рассматриваемой задаче выбор пространств должен в первую очередь определяться физическим смыслом задачи и, лишь во вторую – математическими соображениями.

При проведении выполняемых расчетов необходима сходимость в среднем приближенного решения к точному. Такая среднеквадратическая сходимость определяется в гильбертовом пространстве, с учетом множества функций $x(t)$, при $0 \leq t \leq 1$, интегрируемых по модулю с P -ой степенью, если норма определена

$$\|x\|_{L_P} = \left[\int_0^1 |x(t)|^p dt \right]^{\frac{1}{p}}$$

В рассматриваемой задаче можно говорить об определенности нормы, поскольку множество элементов x является метрическим, так как можно ввести расстояние $\rho(x_1, x_2)$ между любой парой элементов (метрику), удовлетворяющее следующим аксиомам [9]:

1. $\rho(x_1, x_2)$ – вещественное неотрицательное число;
2. $\rho(x_1, x_2) = 0$ только если $x_1 = x_2$;
3. $\rho(x_1, x_2) = \rho(x_2, x_1)$
4. $\rho(x_1, x_3) \leq \rho(x_1, x_2) + \rho(x_2, x_3)$

В исходном множестве элементов x определены операции сложения элементов и умножения их на число, когда норма определяется метрикой, а элементы

принадлежат линейному нормированному пространству [15].

Для решения задачи определения изменения конфигурации деформированной арочной крепи применяется метод интерполяции кубическими сплайнами [12], причем приближенное решение будет сходиться к точному. Вид интерполяционной функции, с помощью которой возможно определить положение арочной крепи в промежуточных точках, будет определяться многочленом третьей степени

$$\begin{aligned} \varphi(x) &= a_i + b_i(x - x_{i-1}) + c_i(x - x_{i-1})^2 + \\ &+ d_i(x - x_{i-1})^3, \\ \text{при} \quad &x_{i-1} \leq x \leq x_i. \end{aligned}$$

Коэффициенты на каждом интервале определяются из условий в узлах. Очевидно, в узлах многочлен должен принимать табличные значения функции, т.е.

$$\begin{aligned} y_{i-1} &= \varphi(x_{i-1}) = a_i, \\ y_i &= \varphi(x_i) = a_i + b_i h_i + c_i h_i^2 + d_i h_i^3, \\ h &= x_i - x_{i-1}. \end{aligned}$$

Исходя из этого, получается число уравнений вдвое меньше числа неизвестных коэффициентов, а, следовательно, для того, чтобы определить координаты деформированной арочной крепи, необходимы дополнительные условия.

Для их получения вычисляется первая и вторая производные многочлена из выражения

$$\varphi'(x) = b_i + 2c_i(x - x_{i-1}) + 3d_i(x - x_{i-1})^2,$$

$$\varphi''(x) = 2c_i + 6d_i(x - x_{i-1})$$

$$\text{при} \quad x_{i-1} \leq x \leq x_i,$$

где основным требованием является непрерывность этих производных во всех точках x , для которых определяются значения смещений, включая узлы.

Приравнявая во внутреннем узле x_1 правые и левые пределы производных, получается

$$\begin{aligned} b_{i+1} &= b_i + 2c_i h_i + 3d_i h_i & 1 \leq i \leq N-1 \\ c_{i+1} &= c_i + 3d_i h_i, & 1 \leq i \leq N-1. \end{aligned}$$

Недостающие два условия получаются из предположения о нулевой кривизне деформированной арочной крепи на концах, так как дополнительные сведения об асимптотике функций в этих точках неизвестны.

Тогда, с учетом изложенного

$$\frac{1}{2} \cdot \varphi''(x_0) = c_1 = 0.$$

и

$$\frac{1}{2} \cdot \varphi''(x_N) = c_N + 3d_N h_N = 0.$$

Способы решения систем полученных линейных алгебраических уравнений подробно рассмотрены в [16].

Для проведения теоретических исследований, исходные данные смещений по реперам используют для матрицы вида

	$x_1 y_1$	$x_2 y_2$	$x_3 y_3$
$n_1 = 50$	$a_{11} b_{11}$	$a_{21} b_{21}$	$a_{31} b_{31}$
$n_2 = 40$	$a_{12} b_{12}$	$a_{22} b_{22}$	$a_{32} b_{32}$
...
...
$n_{15} = 90$	$a_{115} b_{115}$	$a_{215} b_{215}$	$a_{315} b_{315}$
$n_{16} = 100$	$a_{116} b_{116}$	$a_{216} b_{216}$	$a_{316} b_{316}$

когда применив стандартную программу интерполирования функции, заданной таблично кубическим сплайном, получают значения функции в точках интерполяции для каждой группы исходных значений.

После проведения таких теоретических исследований имеется достаточное количество дополнительных точек. При, если требуется определить значения функции на другом интервале, необходимо повторно вычислять коэффициенты интерполяционной формулы.

В этих случаях, возникает необходимость в наличии единой приближенной формулы вида

$$y \approx \varphi(x),$$

пригодной для большого отрезка

$$a \leq x \leq b.$$

Так как исходные функции заданы таблично, т.е. значения рассматриваемой функции, описывающей конфигурацию деформированной арочной крепи определены только на конечном множестве точек, и их скалярное произведение определяется формулой

$$(f, \varphi) = \sum_{i=1}^N \rho_i f(x_i) \varphi(x_i), \quad \rho_i > 0.$$

за N принимаем полное число узлов в таблице, полученной после интерполирования кубическим сплайном. Условие наилучшего среднеквадратического приближения принимает вид

$$\delta \varphi^2 \sum_{i=1}^N \rho_i = \sum_{i=1}^N \rho_i [y(x_i) - \varphi(x_i)]^2 = \min.$$

Выбираем линейную аппроксимацию вида

$$\varphi(x) = \sum_{k=1}^N a_k \varphi_k(x),$$

с числом членов $n \leq N$, в котором коэффициенты аппроксимации находятся из уравнения

$$\sum_{m=1}^N (\varphi_k, \varphi_m) = a_m = (y, \varphi_k), \quad 1 \leq k \leq n.$$

Это способ нахождения аппроксимации называется методом наименьших квадратов, который используется для обработки полученных данных [12].

Если обозначить коэффициенты среднеквадратичного отклонения полученные после использования метода наименьших квадратов как a_{ii}

$$0 \leq i \leq 5.$$

то площадь S_1 можно определить, используя свойство определенного интеграла

$$S_1 = \int_a^b \left(\sum a_i x^i \right) dx,$$

или

$$S_1 = \int_a^b \left(a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + a_4 x^4 + a_5 x^5 \right) dx.$$

На заключительном этапе, необходимо определить площадь нижней части выработки. Зная начальное значение этой величины и принимая во внимание результаты экспериментальных исследований [6, 7], которые показывают, что наибольшие сближения реперов имеют место со стороны висячего бока, т.е. пород

кровли, считаем, что деформации подвержена только та часть крепи, которая находится со стороны кровли пласта.

Определив по выражению (7) величину смещения пород кровли по длине поддерживаемой выработки (с учетом изменения жесткости охранных сооружений), с допустимой степенью погрешности можно осуществить линейную аппроксимацию по двум точкам 0 и 1'. В этом случае, площадь нижней части выработки определяется как разность между начальной величиной площади S_2 и деформированной частью, т.е.

$$S_2 = b \cdot h - \frac{1}{2} U_{кр.} \cdot h.$$

Общая площадь поперечного сечения выработки после деформации определяется как

$$S = S_1 + S_2,$$

или

$$S = a_0 b + \frac{a_1}{2} b^2 + \frac{a_2}{3} b^3 + \frac{a_3}{4} b^4 + \frac{a_4}{5} b^5 + \frac{a_5}{6} b^6 + b h - \frac{1}{2} U_{кр.} h,$$

где $U_{кр.}$ – расчетное смещение пород кровли в пластовой подготовительной выработке.

Алгоритм решения задачи в такой постановке позволяет установить численные значения поперечного сечения откаточного штрека при различных способах охраны по длине, в результате ведения очистных работ, в условиях глубоких шахт.

Обсуждение результатов.

С использованием усовершенствованной модели, позволяющей прогнозировать изменение сечения откаточных штреков при различных способах охраны на их протяжении позади очистного забоя, разработан программный продукт «Forecast», исходными данными которого являются горно-геологическими условия разработки угольных пластов.

Согласно приведенным оценочным расчетам, с использованием разработанного программного продукта, произведено сравнительное вычисление изменения поперечного сечения откаточного штрека при охране деревянными сооружениями и целиками угля. В результате обработки исходных данных, установлен вид

зависимостей, отражающих уменьшение площади поперечного сечения откаточного штрека при его охране деревянными сооружениями и целиками угля по длине поддерживаемой выработки (рис. 3 а, б). Результаты расчетов сравнили с экспериментальными данными, полученными в условиях шахт «Центральная» и «Торецкая». Погрешность вычислений составила 16-20%.

На основании выполненных расчетов можно сделать заключение о том, что при охране штрека деревянными конструкциями, за отметкой $l=40$ м позади очистного забоя, уменьшение площади поперечного сечения штрека практически не наблюдается (рис. 3). В случае оставления целиков угля, такая закономерность не прослеживается (рис.3 б).

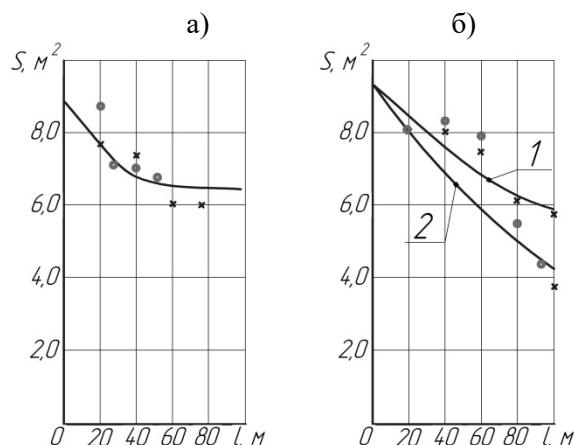


Рис. 3. Изменения площади поперечного сечения откаточного штрека S , (m^2) по длине l , (м) с использованием разработанной модели: а) при охране деревянными конструкциями; б) при охране целиками угля; 1 – $\alpha=29^\circ$; 2 – $\alpha=59^\circ$.

Таким образом, усовершенствованная математическая модель пластовой подготовительной выработки, с использованием интерполяционных сплайнов, позволяет оценить потери площади поперечного сечения эксплуатируемого откаточного штрека при различных способах охраны, с учетом изменения жесткости охранных сооружений в условиях глубоких шахт, разрабатывающих пласты наклонного и крутого залегания. Исходными данными для такой модели являются глубина горных работ, мощность угольного пласта и физико-механические свойства боковых пород. При этом необходимо учитывать и изменение

жесткости охранных сооружений по длине штрека.

В типовых условиях разработки наклонных и крутых угольных пластов для обеспечения эксплуатационного состояния пластовых подготовительных выработок, необходимо ориентироваться на применение податливых охранных сооружений, которые создают достаточный подпор породам кровли, в результате чего, в зоне установившегося горного давления, уменьшения сечения штрека практически не происходит. Угольные целики представляют собой хрупкое охранное сооружение, изменение жесткости которого подчиняется линейному закону, что приводит к резкому ухудшению устойчивости пластовых подготовительных выработок, когда размеры и форма поперечного сечения откаточного штрека не отвечают требованиям Правил безопасности.

Выводы.

Усовершенствованная математическая модель позволяет оценить эффективность применяемых способов охраны откаточных штреков в конкретных горно-геологических условиях. Доказано, что в условиях глубоких шахт, с целью обеспечения эксплуатационного состояния пластовых откаточных штреков, для их охраны целесообразно применение податливых охранных сооружений. Последние, с учетом изменения величины жесткости до определенных значений, обеспечивают достаточный подпор породам кровли и способствуют плавному прогибу расслоившейся толщи по мере продвижения очистного забоя.

Список литературы

1. Викторов С.Д., Иофис М.А., Гончаров С.А. Сдвигание и разрушение горных пород. Москва: Наука, 2005. 277 с.
2. Борисов А.А. Механика горных пород и массив. Москва: Недра, 1980. 360с.
3. Шашенко А.Н., Пустовойтенко В.П., Сдвижкова Е.А. Геомеханика. Киев: Науковий друк, 2016. 528с. ISBN 978-617-635-088-0
4. Селезень А.Л., Томасов А.Г., Андрушко В.Ф. Поддержание подготовительных выработок при разработке крутых пластов. Москва: Недра, 1977. 205с.
5. Жуков В.Е. Об одной стратегической ошибке в разрешении проблемы разработки крутых пластов. *Уголь Украины*. 2001. №7. с.6-10.
6. Подкопаев С.В., Конопелько Е.И., Чепига Д.А., Иорданов И.В., Смоланов И.Н. Исследование проявлений горного давления в подготовительных

выработках с учетом жесткости охранных сооружений. *Вісті Донецького гірничого інституту*. 2018. №1 (42), с. 84-95.

7. Ya. Liashok, I. Iordanov, D. Chepiga, S. Podkopaiev. Experimental studies of the seam opening competence in different methods of protection under pitch and steep coal seams development. *Mining of Mineral Deposits*. 2018. Vol.12, pp. 9-19.

8. Бриджмен П.В. Анализ размерностей. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика». 2001. 148с. ISBN 5-93972-043-9.

9. Пирумов У.Г. Численные методы. М.; Изд-во МАИ, 1998. 188с. ISBN 5-7035-2190-4.

10. Самарский А.А. Введение в численные методы. СПб: Лань, 2009. 288с.

11. Moore R.E., Kearfott R.B., Cloud M. Introduction to interval analysis. Philadelphia: SIAM, 2009. 408p.

12. Корнейчук Н.П. Сплаины в теории приближения. Москва: Наука, 1984. 356с.

13. Varga R.S. Matrix iterative analysis. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2010. 280p.

14. Neumaier A. Interval methods for systems of equations. Cambridge: Cambridge University Press, 1990. 402p.

15. Корнейчук Н.П., Бабенко В.Ф., Лигун А.А. Экспериментальные свойства полиномов и сплайнов. Киев: Наукова думка, 1992. 304с.

16. Шарый С.П. Курс вычислительных методов. Новосибирск, Ин-т вычислительных технологий СО РАН, 2015. 508с.

17. Khari A., Baghbanan A., Norouzi S., Hashemolhosseini H. Effects of fracture geometry and stress on the strength of a fractured rock mass. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Science*. 2013. №60. p.345-352.

18. Аттетков А.В., Галкин С.В., Зарубин В.С. Методы оптимизации. М.; МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 440с.

19. Глебов Н.И., Кочетов Ю.А., Плясунов А.В. Методы оптимизации. Новосибирск: Новосибирский гос. ун-т, 2000. 105с

20. Шукаев Д.Н. Прикладные методы оптимизации. Москва: Издат. дом Академии Естествознания, 2017. 212с. ISBN 978-5-91327-494-6.

21. Владыко А.Б., Мальцев Д.В. Разработка имитационной модели для расчета устойчивости подземной горной выработки. *Уголь Украины*. 2015. №9. с.31-34. ISSN 0041-5804

22. Подкопаев С.В. Обоснование способов повышения устойчивости вентиляционных штреков при отработке крутых пластов: автореф. дисс. ... канд. техн. наук, 05.15.02 /Донецк, ДПИ, 1993. 17с.

23. Зборщик М.П., Подкопаев С.В. Прогнозирование потерь площади поперечного сечения штреков при отработке тонких крутых пластов. *Уголь Украины*. 1993. №3. с.5-7.

References

1. Viktorov S.D. Iofis M.A., Goncharov S.A. (2005), Shift and destruction of rocks [*Sdvizhenie i razrushenie gornyih porod*], Science, Moscow, 277 pp. (in Russian)
2. Borisov A.A. (1980), Mechanics of rocks and massif [*Mehanika gornyih porod i massiv*], Nedra, Moscow, 360p. (in Russian)

3. Shashenko A.N., Pustovoitenko V.P., Spedicova E.A. (2016), Geomechanics [*Geomehanika*], Scientific seal, Kiev, 528p. ISBN 978-617-635-088-0 (in Russian)
4. Selezenev A.L., Tomasov A.G., Andrushko V.F. (1977), Maintenance of preparatory workings in the development of steep seams [*Podderzhanie podgotovitelnykh vyirabotok pri razrabotke krutykh plastov*], Nedra, Moscow, 205p. (in Russian)
5. Zhukov V.E. (2001), On one strategic error in solving the problem of the development of steep seams [*Ob odnoy strategicheskoy oshibke v razreshenii problemy razrabotki krutykh plastov*], Coal of Ukraine, No. 7, pp. 6-10. (in Russian)
6. Podkopaev S.V., Konopelko E.I., Chepiga D.A., Iordanov I.V., Smolanov I. N. (2018), The study of the manifestations of rock pressure in the preparatory workings, taking into account the rigidity of security structures [*Issledovanie proyavleniy gornogo davleniya v podgotovitelnykh vyirabotkakh s uchetom zhestkosti ohrannykh sooruzheniy*], Journal of Donetsk Mining Institute, No. 1 (42), pp. 84-95. (in Russian)
7. Liashok Ya., Iordanov I., Chepiga D., Podkopaev S. (2018), Experimental studies of the seam opening competence in different methods of protection under pitch and steep coal seams development. *Mining of Mineral Deposits*. No. 12, pp. 9-19. (in English)
8. Bridzhmen P.V. (2001), Dimensional analysis [*Analiz razmernostey*], Izhevsk: Scientific Publishing Center "Regular and Chaotic Dynamics", 148p. ISBN 5-93972-043-9. (in Russian)
9. Pirumov U.G. (1998), Numerical methods [*Chislennyye metody*], MAI publishing house, 188p. ISBN 5-7035-2190-4. (in Russian)
10. Samarskiy A.A. (2009), Introduction to numerical methods [*Vvedenie v chislennyye metody*], Lan, St. Petersburg, 288p. (in Russian)
11. Moore R.E., Kearfott R.B., Cloud M. (2009), Introduction to interval analysis, Philadelphia: SIAM, 408p. (in English)
12. Korneychuk N.P. (1984), Splines in approximation theory [*Spliny v teorii priblizheniya*], Science, Moscow, 356p. (in Russian)
13. Varga R.S. (2010), Matrix iterative analysis, Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 280p. (in English)
14. Neumaier A. (1990), Interval methods for systems of equations, Cambridge: Cambridge University Press, 402p. (in English)
15. Korneychuk N.P., Babenko V.F., Ligon A.A. (1992), Experimental properties of polynomials and splines [*Eksperimentalnyye svoystva polinomov i splaynov*], Scientific Opinion, Kyiv, 304p. (in Russian)
16. Sharyiy S.P. (2015), The course of computational methods [*Kurs vychislitelnykh metodov*], Institute of Computational Technologies SB RAS, Novosibirsk, 508p. (in Russian)
17. Khari A., Baghbanan A., Norouzi S., Hashemolhosseini H. (2013), Effects of fracture geometry and stress on the strength of a fractured rock mass. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Science*. No. 60, p.345-352. (in English)
18. Attetkov A.V., Galkin S.V., Zarubin V.S. (2003), Optimization methods [*Metody optimizatsii*], Bauman MSTU, Moscow, 440s. (in Russian)
19. Glebov N.I., Kochetov Yu.A., Plyasunov A.V. (2000), Optimization methods [*Metody optimizatsii*], Novosibirsk State University, Novosibirsk, 105p. (in Russian)
20. Shukaev D.N. (2017), Applied methods of optimization [*Prikladnyye metody optimizatsii*], Publishing House "Academy of Natural History", Moscow, 212p. ISBN 978-5-91327-494-6. (in Russian)
21. Vladiko A.B., Maltsev D.V. (2015), Development of a simulation model for calculating the stability of the underground mine workings [*Razrabotka imitatsionnoy modeli dlya rascheta ustoychivosti podzemnoy gornoy vyirabotki*], Coal of Ukraine, No. 9, pp.31-34. (in Russian)
22. Podkopaev S.V. (1993), Justification of ways to improve the stability of the ventilation drift during the development of steep seams [*Obosnovanie sposobov povysheniya ustoychivosti ventilyatsionnykh shrekov pri otrabotke krutykh plastov*], Abstract of dissertation for the degree of candidate of technical sciences, 05.15.02, Donetsk, DPU, 17p. (in Russian)
23. Zborschik M.P., Podkopaev S.V. (1993), Prediction of losses of the cross-sectional area of drifts when developing thin steep beds [*Prognozirovanie poter ploschadi poperechnogo seche-niya shrekov pri otrabotke tonkikh krutykh plastov*], Coal of Ukraine, No.3. pp. 5-7. (in Russian)

Надійшла до редакції 03.12.2018

Рецензент д-р. техн. наук, проф. А.К. Семенченко.

Подкопаев Сергей Викторович – доктор технических наук, профессор, Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет», (пл. Шибанкова, 2, г. Покровск, 85300, Украина).

E-mail: serhii.podkopaiev@donntu.edu.ua.

Чепига Дарья Анатольевна – аспирант кафедры «Разработка месторождений полезных ископаемых», Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет», (пл. Шибанкова, 2, г. Покровск, 85300, Украина).

E-mail: daria.chepiha@donntu.edu.ua.

ПРО ПРОГНОЗУВАННЯ СТІЙКОСТІ ВІДКАТНИХ ШТРЕКІВ ПРИ РІЗНИХ СПОСОБАХ ОХОРОНИ В ГЛИБОКИХ ШАХТАХ

Мета. Прогнозування стійкості відкатних штретів з використанням удосконаленої математичної моделі пластової підготовчої виробки, що дозволяє оцінити зміну її поперечного перерізу при різних способах охорони, в умовах глибоких шахт, що розробляють вугільні пласти похилого або крутого залягання.

Методи. У дослідженнях використовується комплексний підхід, що включає аналіз і узагальнення теоретичних досліджень з прогнозування стійкості підготовчих виробок і вдосконалення математичної моделі

пластової підготовчої виробки, що дозволяє оцінити втрати площі поперечного перерізу експлуатованого відкатного штреку при різних способах охорони.

Результати. Розглядаючи стійкість пластової підготовчої виробки, як її здатність зберігати задані розміри і форму протягом усього терміну експлуатації, для типових умов розробки вугільних пластів українського Донбасу встановлено, що використання піддатливих охоронних споруд, що зводяться над штреком, забезпечує мінімальні втрати його поперечного перерізу по довжині (позаду очисного забою) в порівнянні з охороною виробки крихкими спорудами. При побудові моделі, що дозволяє оцінити втрати поперечного перерізу пластових відкатних штреків при різних способах охорони, крім основних факторів, що впливають (глибина гірничих робіт, потужність вугільного пласта, який розробляється, фізико-механічні властивості бічних порід), враховується і зміна жорсткості охоронних споруд по довжині підтримуваної виробки.

Наукова новизна. Використання інтерполяційних сплайнів, як інструменту геометричного моделювання, для прогнозування стійкості пластових підготовчих виробок, з урахуванням зміни жорсткості охоронних споруд по довжині відкатного штреку, в умовах похилого і крутого залягання вугільних пластів.

Практична значимість. Наведено рекомендації з прогнозування стійкості відкатних штреків, з урахуванням застосовуваних, в конкретних гірничо-геологічних умовах, способів охорони. Відзначається, що для забезпечення експлуатаційного стану пластових підготовчих виробок, позаду очисного забою, в умовах глибоких шахт, необхідно орієнтуватися на застосування піддатливих охоронних споруд, які забезпечують достатній підпір осідаючої породної товщі позаду очисного забою.

Ключові слова: математична модель, переріз, втрати, гірничий тиск, штрек.

Подкопась Сергій Вікторович – доктор технічних наук, професор, Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет», (пл. Шибанкова, 2, м. Покровськ, 85300, Україна).

E-mail: serhii.podkopaiev@donntu.edu.ua.

Чепіга Дар'я Анатоліївна – аспірант кафедри «Розробка родовищ корисних копалин», Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет», (пл. Шибанкова, 2, м. Покровськ, 85300, Україна).

E-mail: daria.chepiha@donntu.edu.ua.

ON THE PREDICTION OF THE STABILITY OF HAULAGE GATES UNDER DIFFERENT METHODS OF PROTECTION IN DEEP MINES

Purpose. Prediction of the stability of haulage drifts using an improved mathematical model of reservoir preparatory development, allowing to estimate the change in its cross-section with different methods of protection, in conditions of deep mines developing inclined or steep coal seams.

Methodology. The studies use an integrated approach, including the analysis and synthesis of theoretical studies on the prediction of the stability of preparatory workings and the improvement of the mathematical model of reservoir preparatory production, allowing estimating the loss of the cross-sectional area of the operated haulage drift under various methods of protection.

Results. Considering the sustainability of the reservoir preparatory development, as its ability to maintain the specified dimensions and shape during the entire service life, for typical conditions of development of coal seams of the Ukrainian Donbass, it has been established that the use of compliant security structures erected above the drift provides the minimum loss of its cross-section along the length (behind clearing face) in comparison with the protection of the development of fragile structures. When building a model that allows assessing the loss of cross section of reservoir haulage drifts with various methods of protection, in addition to the main influencing factors (depth of mining, thickness of the coal seam being developed, physical and mechanical properties of lateral rocks), the change in rigidity of security structures along the length development.

Scientific novelty. The use of interpolation splines as a tool for geometric modeling to predict the stability of reservoir development workings, taking into account changes in the rigidity of security structures throughout the haulage, under conditions of inclined and steep coal seams.

Practical significance. Recommendations are given for predicting the stability of haulage drifts, taking into account the methods of protection used in specific geological conditions. It is noted that to ensure the operational status of reservoir preparatory workings, behind the clearing face, in deep mine conditions, it is necessary to focus on the use of flexible security structures that provide sufficient backwater to the subsiding rock mass behind the clearing face.

Key words: symbolic model, crosssection, rock pressure, loss, roadway.

Podkopaev Serhii - Doctor of Technical Sciences, Professor, Public higher education institution Donetsk National Technical University, (2, Shybankova square, Pokrovsk, Donetsk region, 85300 Ukraine).

E-mail: serhii.podkopaiev@donntu.edu.ua.

Chepiga Daria – graduate student, Public higher education institution Donetsk National Technical University, (2, Shybankova square, Pokrovsk, Donetsk region, 85300 Ukraine).

E-mail: daria.chepiha@donntu.edu.ua.