

ОСОБЕННОСТИ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПУЧЕНИЯ СЛОИСТЫХ ПОРОД ПОЧВЫ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

Наведено аналітичні дослідження закономірностей здимання шаруватих порід підшви гірничих виробок при втраті їх повздовжньо-поперечної стійкості. Дано пояснення випадків "однобічного" й "центрального" підняття порід. Розглянуто механізм й умову розвитку тріщини між шаром, що здимається, та нижчележачими породами підшви.

FEATURES AND LAWS OF THE HEAVE OF LAYERED SOLE' ROCKS IN MINE WORKINGS

Analytical researches of laws of the heave of layered sole' rocks in mine workings are resulted at loss of their longitudinal - cross stability. The explanation of cases of a "unilateral" and "central" rocks rising is given. The mechanism and a condition of development of a crack between a heave' layer and below laying rocks of sole' rocks is considered.

Одной из самых распространенных форм проявлений горного давления является пучение почвы горных выработок, которое происходит либо в виде потери устойчивости слоистых пород при продольно-поперечном изгибе либо в результате образования зоны неупругих деформаций (ЗНД) в почве [1]. В настоящее время существует ряд гипотез, объясняющих механизм и причины пучения пород почвы, однако не все из них достаточно точны и достоверны, некоторые либо имеют ограниченную область применения, либо сложны в использовании, а иногда требуют значительного объема геологической и горнотехнической информации и проведения трудоемких шахтных замеров. Недостаточно изучены и поэтому не объяснены причины и механизмы известных из горной практики разновидностей "центрального" и "одностороннего" пучения пород почвы. Поэтому так важно продолжить изучение пучения горных пород с учетом слоистости и особенностей взаимодействия с окружающим массивом для объяснения причин и выявления наиболее значимых факторов, что и являлось целью данной работы.

Реальный массив горных пород, как правило, не является однородным и изотропным, а представлен слоями различной прочности с ослабленными межслоевыми связями. Кроме того, появление трещин в массиве, особенно после проведения горной выработки, создает дополнительные плоскости ослаблений. Поэтому породы, залегающие в почве выработки, необходимо рассматривать с учетом сложности их структурного, и, в частности, слоистого строения. Наиболее опасным с точки зрения устойчивости следует считать верхний слой почвы горных пород. Его можно представить как плиту в плоско-деформированном состоянии на упругом (винклеровском) основании в виде нижележащих пластов почвы. На балку-плиту действуют горизонтальные сжимающие силы P со стороны массива, которые вызывают вертикальные реакции со стороны винклеровского основания.

Известно, что подвигание забоя горной выработки при ее проведении вызывает концентрацию напряжений, которые во многом зависят от кривизны ее

контура. Поэтому угловые точки контура выработки выступают как локальные концентраторы, где напряжения оказываются в несколько раз больше, чем на остальной части контура (рис. 1, а). Это приводит к тому, что разрушения пород вокруг горной выработки в первую очередь начинаются в ее углах, когда зона неупругих деформаций в кровле и боках выработки еще не образовалась, что отражено расчетной схемой на рис. 1, б).

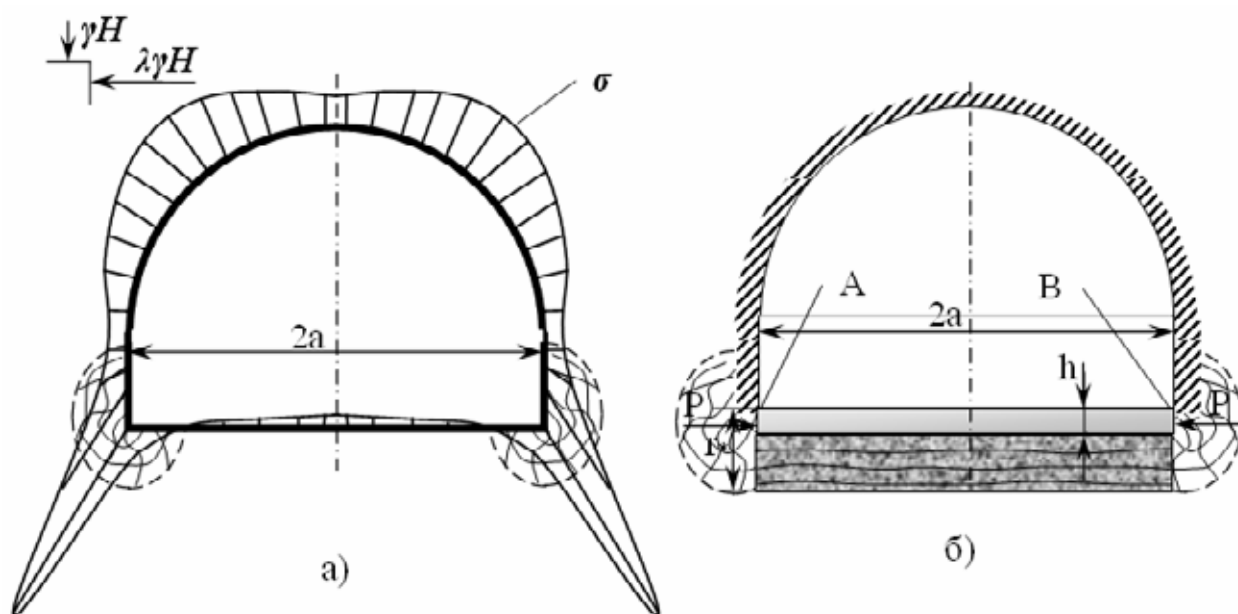


Рис. 1 – Эпюры распределения напряжений на контуре выработки и расчетная схема деформирования породной балки в почве

Задачу формулируем в плоской постановке, когда плиту можно рассматривать как породную балку единичной ширины, имеющую размеры: длина пролета – $2a$, высота – h , ширина – $b = 1$ м (рис. 1, б, 2). Нагрузку P , приложенную к торцам балки, трактуем как равнодействующую горизонтальных напряжений, действующих на концы балки (А, В, рис. 1, б, 2) со стороны окружающего массива. В угловых точках контура (на правом конце балки точка С, рис. 2) горизонтальные напряжения сжатия из-за повышенной концентрации и последующего разрушения пород снижаются до нуля, увеличиваясь в глубь массива по закону, близкому к линейному. Поэтому распределение горизонтальных напряжений по вертикальным торцам балки принято по закону треугольника. Максимальное значение действующих напряжений (точка D, рис. 2) будет равно прочности пород на одноосное сжатие $[\sigma_c]$.

Таким образом, принята («с запасом») самая неблагоприятная схема разрушения пород в угловых точках выработки и распределения напряжений в зоне разрушения. Мощность слоев пород почвы h , подверженных пучению, будет соответствовать радиусу r_* зоны неупругих деформаций (ЗНД) в углах выработки, который можно определить, используя известные методики [2, 3 и др.]. Таким образом, расстояние между точками С и D (рис. 2) соответствует радиусу r_* ЗНД.

Деформационно-силовая связь балки с нижележащими слоями почвы характеризуется коэффициентом постели c , который по данным натурных экспериментальных исследований может изменяться в широких пределах от $10 - 50 \text{ кг/см}^3$ (для разрушенных или трещиноватых пород) до $300 - 500 \text{ кг/см}^3$ (для плотных оснований). Используется расчетная схема [4], согласно которой нагрузка на балку со стороны винклеровского основания будет определяться выражением:

$$q = c y(x),$$

где $y(x)$ – прогиб балки в произвольной точке с координатой x .

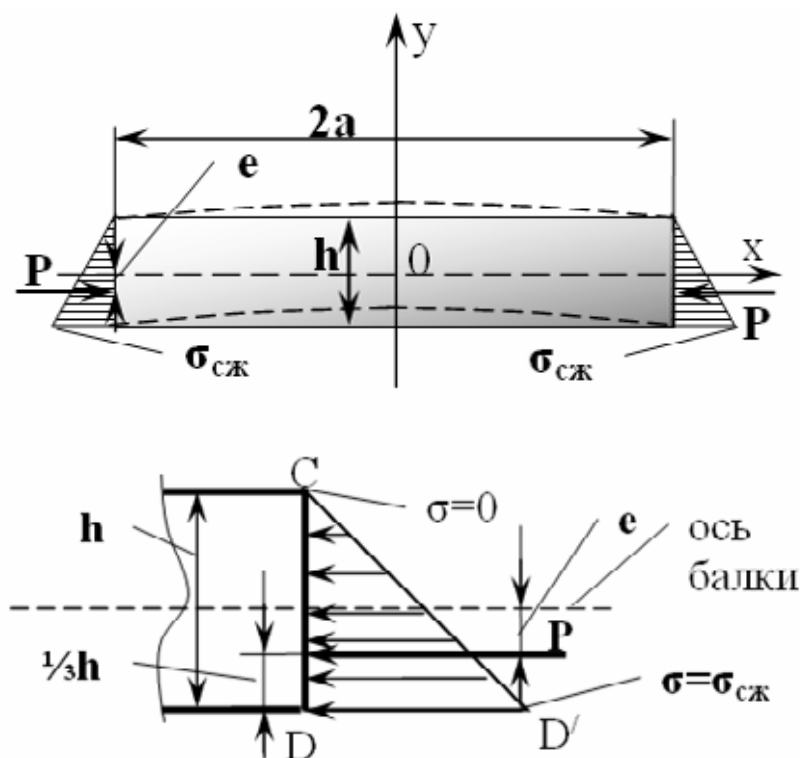


Рис. 2 – Напряжения и силы, действующие на торце балки

Если a – половина ширины выработки, то длина пролета балки равна $2a$. За начало координат ($x = 0$) принят центр выработки. Распределенная таким образом нагрузка приводит к возникновению изгибающих моментов $M = P \cdot e$, постоянных по длине балки: (где e – эксцентриситет приложения нагрузки относительно нейтральной оси балки, $e = h/6$, рис. 2).

Дифференциальное уравнение балки на упругом (винклеровском) основании [4]:

$$EJy^{IV} - c \cdot y = 0 \quad (1)$$

Общий интеграл уравнения (1) будем искать в виде [4]:

$$y = e^{-\lambda x} (c_1 \sin \lambda x + c_2 \cos \lambda x) + e^{\lambda x} (c_3 \sin \lambda x + c_4 \cos \lambda x) \quad (2)$$

Проведя операции дифференцирования, получаем выражения первой, второй, третьей и четвертой производных y . Решив их с учетом граничных условий, находим постоянные интегрирования c_1, c_2, c_3, c_4 , а также параметр λ :

$$\lambda = \sqrt[4]{c/(4EJ)}$$

$$c_1 = -\frac{m \cdot e^{\lambda} \cos \lambda (1 + e^{2\lambda})}{4 \cdot e^{2\lambda} \cdot \sin^2 \lambda - 1 - 2 \cdot e^{2\lambda} - e^{4\lambda}}$$

$$c_2 = -\frac{m \cdot e^{\lambda} \sin \lambda (-1 + e^{2\lambda})}{4 \cdot e^{2\lambda} \cdot \sin^2 \lambda - 1 - 2 \cdot e^{2\lambda} - e^{4\lambda}} \quad (3)$$

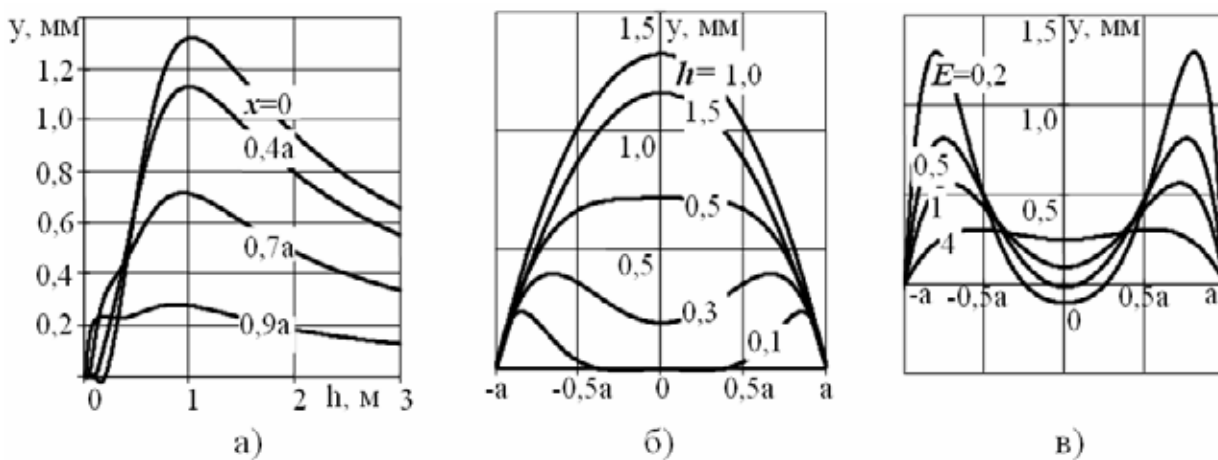
$$c_3 = -c_1$$

$$c_4 = c_2$$

где $m = \frac{M}{2\lambda^2 \cdot EJ}$

Подставляя полученные значения $c_1, c_2, c_3, c_4, \lambda$ с учетом исходных данных в уравнение (2), получим величины прогибов балки $y(x)$ при значении x в пределах $-a < x < a$.

С помощью разработанной для Mathcad программы, используя выражения (2, 3), были выполнены расчеты и построены графики зависимостей прогибов y породных слоев, залегающих в почве выработки от влияющих факторов (рис. 3,4). Для построения графиков были приняты следующие исходные значения входящих величин: модуль упругости породы $E = 2 \cdot 10^4$ МПа; коэффициент постели $c = 5 \cdot 10^9$ Н/м³; предел прочности пород на сжатие $\sigma_{сжс} = 40$ МПа. Каждый график построен как функциональная зависимость $y = f(z)$, где z – один из влияющих факторов, при фиксированных значениях остальных факторов.



а) – толщины слоя h ($x=0 \dots 0,9a$);
 б) – координаты по оси x ($h=0,1 \dots 1,5$ м); в) – координаты по оси x ($E=0,2 \dots 4 \cdot 10^4$ МПа)

Рис. 3 – Влияние различных факторов на величину прогибов y балки

На рис. 3,а показана зависимость прогибов породной балки от ее толщины для различных сечений по оси x ($x=0\dots 0,9a$). Важно то, что график имеет явно выраженный экстремум, для принятого набора данных - при толщине породного слоя около 1 м. При уменьшении модуля упругости пород E до $1 \cdot 10^4$ МПа, экстремум перемещается в сторону увеличения мощности слоя (в этом случае $h = 1,2\dots 1,5$ м). То же самое происходит при увеличении коэффициента постели c до $10 \cdot 10^9$ Н/м³.

На графиках (рис 3, б, в) показаны смещения пород вдоль оси ($-a < x < a$) балки, при этом каждая линия соответствует определенному значению мощности породного слоя (рис. 3, б - $h = 0,1\dots 1,5$ м) либо модуля упругости пород (рис. 3, в - $E = 0,2 \cdot 10^4 \dots 4 \cdot 10^4$ МПа). Максимальные смещения вдоль оси балки возникают в среднем сечении (при $x = 0$, рис. 3 – а, б), однако, как видно из графиков (рис. 3, б), при небольшой толщине породного слоя ($h < 0,5$ м), максимальное поднятие пород удаляется от среднего сечения балки к угловым точкам контура выработки. Для ясности понимания и удобства описания процессов и параметров деформирования слоев пород, залегающих в почве выработки, введем понятие *критической толщины слоя* h_{min} . Это такая толщина породного слоя, ниже которой точка максимального поднятия x_{max} смещается от центра выработки к ее бокам.

Влияние модуля упругости E на характер деформирования пород видно из рис. 3, в. Снижение модуля упругости в пять раз (с $1 \cdot 10^4$ до $0,2 \cdot 10^4$ МПа) приводит к возрастанию максимальных прогибов слоев y_{max} примерно в два раза (при толщине слоя $h = 0,3$ м), при этом x_{max} смещается к бокам выработки. Таким образом, чем ниже модуль упругости пород E , тем выше вероятность того, что начало пучения будет смещено относительно центра выработки. На практике не всегда возможно определить точное значение модуля упругости пород E , особенно, когда в почве залегают разные слои пород (аргиллит, алевролит, песчаник и т.д.), каждый из которых имеет свое значение E . Однако, как показано выше, существенная ошибка в определении величины E (в два раза) приведет к ошибке в определении прогибов y не более чем на 15-30%.

Снижение коэффициента постели c способствует "центральному" поднятию пород почвы (рис. 4, а).

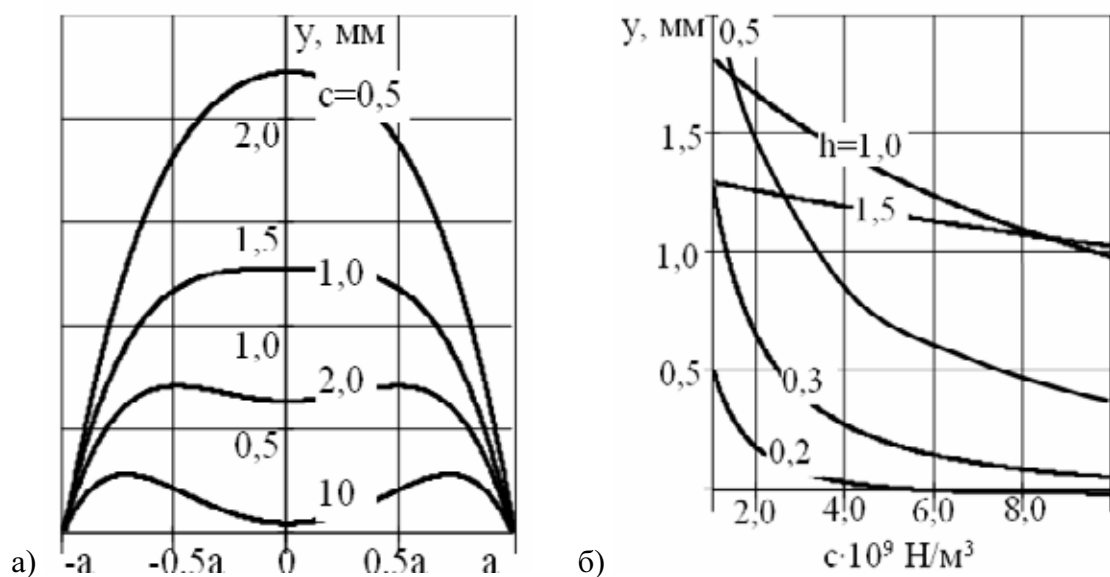
При толщине балки $h = 0,3$ м изменение коэффициента постели c от в 20 раз приводит к уменьшению максимальных прогибов y примерно в 8 раз (рис. 4, а). При этом меняется качественная картина деформирования балки – с ростом коэффициента постели c координата x_{max} удаляется от центра выработки.

При толщине породного слоя $h < 0,5$ м, влияние коэффициента постели c на величину прогибов y существенно, при $h > 1,0\dots 1,5$ м оно заметно уменьшается (рис. 4, б).

Координату максимального поднятия почвы x_{max} можно получить, приравняв нулю первую производную уравнения прогибов:

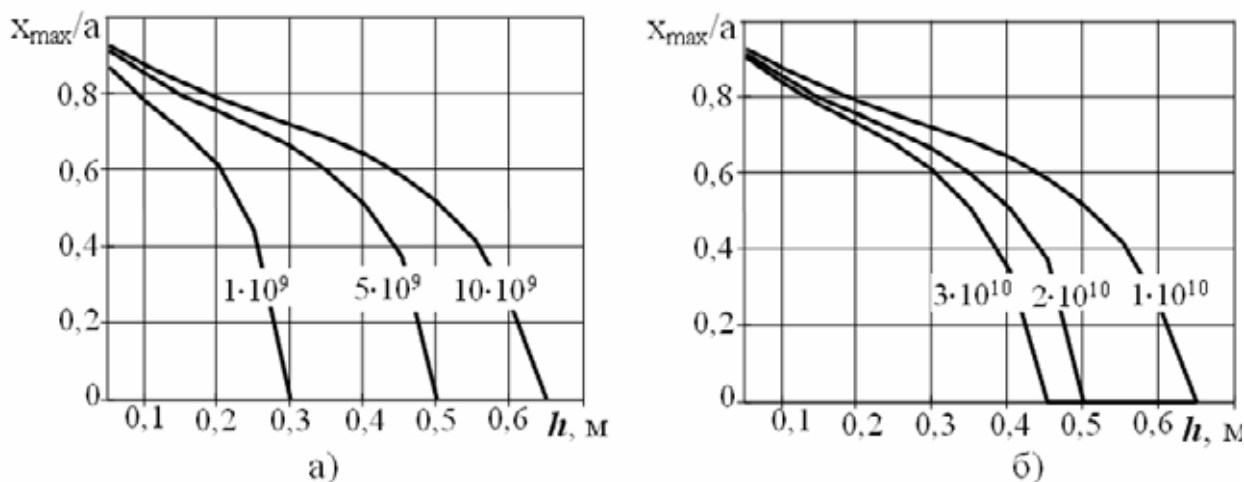
$$y' = \cos(\lambda \cdot x_{max}) \cdot [c_1 - c_2 + e^{2\lambda \cdot x_{max}} \cdot (c_2 - c_1)] - \sin(\lambda \cdot x_{max}) \cdot [(1 + e^{2\lambda \cdot x_{max}}) \cdot (c_1 + c_2)] = 0 \quad (4)$$

Подставив в уравнение (4) значения входящих величин λ , c_1 , c_2 , вычисленных с учетом исходных данных (h , $2a$, $[\sigma_c]$, E , c), можно выразить из него искомое значение x_{max} . Влияние каждого из факторов на величину x_{max} можно проследить, построив соответствующие зависимости.



а) – $-a < x < a$; б) – при изменении толщины балки ($h=0,2\dots 1,5$ м)
 Рис. 4 – Влияние коэффициента постели c на величину прогибов y породной балки

Зависимость координаты максимального поднятия x_{max} от толщины балки h при разных коэффициентах постели c или модулях упругости пород даны на рис. 5, а, б. Из графиков видно, что при уменьшении модуля упругости пород E или увеличении коэффициента постели c , критическая толщина h_{min} возрастает. Так, при увеличении c в 10 раз толщина h_{min} возрастает с 0,3 м до 0,65 м, а при уменьшении E в 3 раза значение h_{min} увеличивается в 1,5 раза.



а) – $c = 1 \cdot 10^9 \dots 10 \cdot 10^9$ Н/м³; б) – $E = 1 \cdot 10^4 \dots 3 \cdot 10^4$ МПа
 Рис. 5 – Зависимость координаты максимального поднятия x_{max} от толщины балки h (центр балки $x=0$)

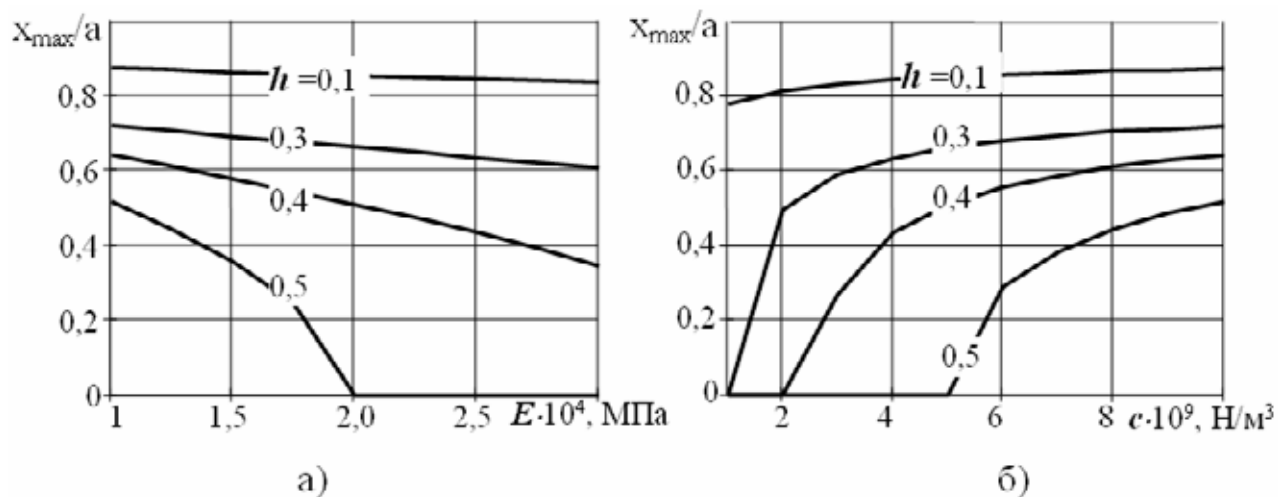
Зависимости координаты максимального поднятия x_{max} от модуля упругости пород E (рис. 6, а) и коэффициента постели c (рис. 6, б) подтверждают, что для тонких слоев ($h < 0,3 - 0,4$ м) точка максимального поднятия смещена относительно центра выработки. При этом, чем меньше толщина слоя, тем меньше изменение параметров E и c сказывается на изменение x_{max} . Например, для слоя мощностью $h = 0,1$ м, изменение модуля упругости E в три раза вызывает изменение x_{max} с $0,88 \cdot a$ до $0,84 \cdot a$ (на 5%) (рис. 6, а), при изменении коэффициента постели c в десять раз x_{max} меняется с $0,78 \cdot a$ до $0,88 \cdot a$ (на 13%) (рис. 6, б).

Анализ графиков (см. рис. 3 – 6) и расчетных формул (1 – 3) позволяет выделить факторы, существенно влияющие на величину прогибов породной балки: мощность породных слоев h , прочность пород почвы $\sigma_{сж}$ и ширина выработки $2a$. Модуль упругости E и коэффициент постели c влияют на прогибы менее заметно. Это позволяет снизить требования к точности их определения.

Особый интерес представляет изучение условий отрыва слоя от массива и его выпирание в выработку (потеря устойчивости слоя), что требует определения нагрузок на балку со стороны основания и сравнения их с критическими. Условие потери устойчивости запишется в виде:

$$c \cdot y > \sigma_{c.p.}; \quad (5)$$

где $\sigma_{c.p.}$ – предел прочности между слоями на разрыв перпендикулярно плоскости ослабления.



а) модуля упругости пород E ; б) коэффициента постели c

Рис. 6 – Зависимость координаты максимального поднятия x_{max} от ($h=0,1 \dots 0,5$ м)

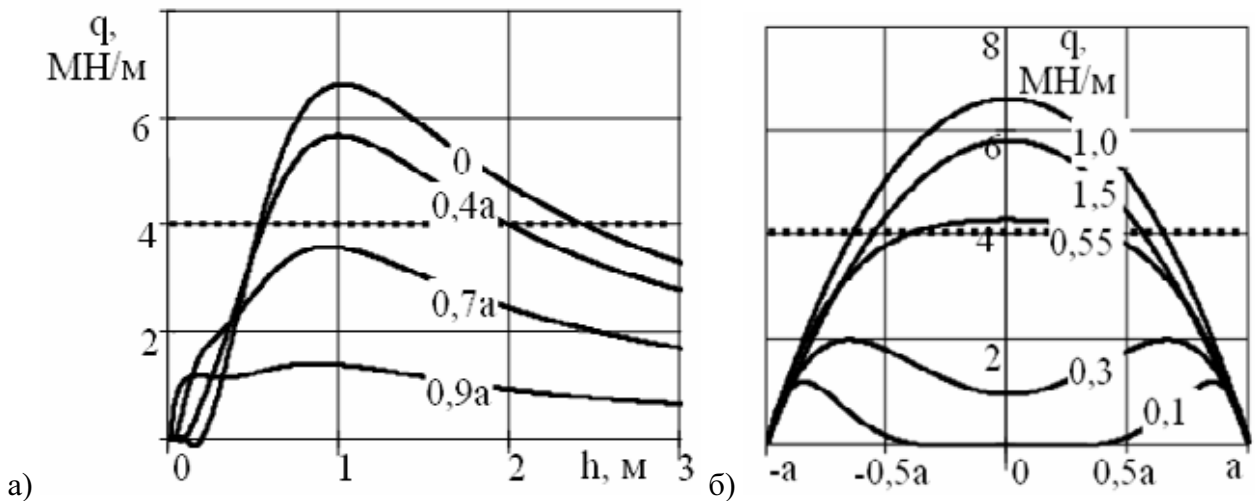
Выполнение условия (5) приведет к появлению трещины между пучающим слоем и массивом горных пород, т.е. разрыву связи между породной балкой и основанием. Дальнейшее деформирование балки под действием изгибающих моментов приведет к ее значительному смещению внутрь выработки, т.е. к пучению почвы. Если слой представлен прочными хрупкими породами значи-

тельной мощности, этот процесс может носить быстрый, внезапный характер. При этом порода резко приподнимается и растрескивается на отдельные глыбы или блоки с образованием открытых трещин, ударно перемещаясь при этом в выработку [5].

Поскольку нагрузки на балку q со стороны нижележащего слоя определяются как $q = c \cdot y$, т.е. прямо пропорциональны прогибам y , то зависимость нагрузок на балку q от влияющих факторов подобна графикам рис. 3, 4, но умноженным на c (рис. 7).

Если почва представлена однородными породами без ослаблений и трещин, точечная линия на графиках (рис. 7) соответствует прочности пород на растяжение σ_p . При слоистых трещиноватых породах и наличии плоскостей ослаблений, эта линия характеризует прочность слоев на разрыв – $\sigma_{c.p.}$. Отрыв балки от породного основания и дальнейшее развитие процесса пучения произойдет, если нагрузки q превысят предел прочности σ_p ($\sigma_{c.p.}$), т.е. участок графиков выше точечной линии характеризует потерю устойчивости пород и пучение, ниже – устойчивое состояние пород почвы. Таким образом, из рис. 7 видно, что пучение почвы начнется для слоя, толщина которого $h \approx 0,55$ м. Максимальное поднятие в данном случае будет наблюдаться в центре выработки. Если учесть возможность структурного ослабления пород ($\sigma_{c.p.} < \sigma_p$), предел устойчивости (точечная линия рис. 7) перемещается вниз, и процесс пучения оказывается возможным для меньшей толщины слоя h , при этом максимальная амплитуда выпирания пород сместится от центра к бокам выработки. Ее координату можно определить, решив уравнение (4) для конкретного сочетания исходных данных. Наличие структурного ослабления между слоями приводит к уменьшению их прочности на разрыв $\sigma_{c.p.}$. Рис. 7 показывает, что чем меньше значение $\sigma_{c.p.}$, тем слои меньшей мощности в первую очередь потеряют продольную устойчивость и будут вовлечены в процесс пучения и тем более вероятно несимметричное пучение.

Если координата начала пучения смещена относительно центра, то с высокой степенью вероятности можно полагать, что потеря устойчивости слоев произойдет не одновременно и симметрично с обеих сторон от оси выработки, а поскольку массив горных пород не является идеальным и содержит различные неоднородности и включения, пучение начнется и будет продолжаться с какой-либо одной ее стороны. Такое несимметричное начало пучения приводит к разрушению пород, перераспределению и снижению их напряженного состояния, что способствует подавлению проявления пучения на симметричной стороне выработки. Такое несимметричное проявление пучения усугубляется горно-техническими условиями, (угол падения пород, неоднородность пород, нагрузка на почву от оборудования, транспорта, трещиноватость при проведении выработки и т.д.). Этим можно объяснить часто наблюдаемое в горных выработках «одностороннее» (со смещением от центра) пучение пород.



а) – от толщины слоя h ($x = 0 \dots 0,9a$); б) – от координаты x ($h=0,1 \dots 1,5$ м)
 Рис. 7 – Зависимость нагрузки на породную балку со стороны основания q

После образования горизонтальной трещины дальнейшее деформирование балки и ее смещение внутрь выработки происходит в зависимости от соотношения приложенных к слою нагрузок и его прочностных свойств. Критерии устойчивости породных слоев, не связанных с основанием, с учетом соотношения действующих в массиве напряжений σ , прочности пород $[\sigma_c]$, и критических напряжений σ_k , даны в работе [6].

Для установления величины поднятия пород почвы в зависимости от толщины слоя, теряющего устойчивость и боковых смещений пород можно воспользоваться зависимостями, предложенными нами в работе [7].

Выводы.

1. Известные из практики случаи "центрального" и "одностороннего" пучения почвы предопределяются условиями залегания (толщина слоя h , ширина пролета $2a$, прочность пород $[\sigma_c]$, $\sigma_{c.p.}$) и параметрами деформирования (модуль упругости E , коэффициент постели c) слоистых пород почвы. При этом проявление той или иной схемы пучения зависит от соотношения влияющих факторов.

2. Каждый из рассмотренных факторов влияет на потерю устойчивости породных слоев, залегающих в почве выработки, следующим образом:

а) Увеличение толщины слоя h , пока он меньше экстремального значения $h < h_*$, приводит к возрастанию прогибов, дальнейшее увеличение h ($h > h_*$) уменьшает прогибы.

б) Повышение прочности пород почвы $[\sigma_c]$ приводит к уменьшению разрушений в углах выработки, т.е. радиус ЗНД r_* , равный мощности пород h , склонных к пучению, уменьшается, следовательно, уменьшаются и прогибы таких слоев. Чем выше прочность пород почвы $[\sigma_c]$, тем меньше величина $r_* = h$, а значит, тем вероятнее картина пучения со смещением максимальной амплитуды от центра к бокам выработки.

в) Влияние модуля упругости пород E на величину прогибов, по сравнению

с предыдущими тремя факторами, выражено меньше. Так, снижение E в пять раз приводит к возрастанию максимальных прогибов в два раза (рис. 3, в), причем это соотношение зависит от толщины породного слоя. Чем толщина балки меньше, тем меньше влияет модуль упругости на величину ее прогибов.

г) Увеличение коэффициента постели c приводит к снижению прогибов балки, при этом влияние c существенно при $h < 0,5$ м, при $h > 1,0...1,5$ м оно заметно уменьшается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Литвинский Г.Г. Механизм пучения пород почвы подготовительных выработок / Уголь. – 1987. – №2. – С. 15-17.
2. Шашенко А.Н., Пустовойтенко В.П. Механика горных пород: Учебник. – К.: Новий друк, 2003. – 399 с.
3. Литвинский Г.Г., Гайко Г.И., Кулдыркаев Н.И. Стальные рамные крепи горных выработок. – К.: Техника, 1999. – 216 с.
4. Ржаницын А.Р. Строительная механика: Учеб. пособие для строит. спец. вузов. – 2 -е изд., перераб. – М.: Высш. шк., 1991. – 439 с.
5. Шатилов В.А. Внезапные поднятия и выбросы пород на шахтах. – К.: Техника, 1972. – 135 с.
6. Литвинский Г.Г., Фесенко Э.В. Критерии устойчивости слоистых пород почвы // Горная геология, геомеханика и маркшейдерия. Сборник научных докладов. – Донецк: УкрНИМИ НАН Украины, 2004. – С. 330-335.
7. Литвинский Г.Г., Фесенко Э.В. Динамическая потеря устойчивости слоистых пород почвы // Изв. вузов. Горный журнал. – 2004. – №4. – С. 124-127.

УДК 622.281

В.Я. Кириченко

ШТРЕКОВЫЕ КРЕПИ, ПРОВЕРЕННЫЕ ВРЕМЕНЕМ И ПРИЗНАННЫЕ ШАХТЕРАМИ

Наведені геометричні та деформаційно-силові характеристики нових штрекових металокреплень.

ROAD SUPPORTS TESTED BY TIME AND RECOGNIZED BY COLLIERS

The reduced geometrical and straining-force performances new streak metal supports.

Ключевой задачей развития подземного комплекса угольных шахт является долговременное поддержание разветвленной сети горных выработок в эксплуатационном состоянии. В связи с этим, создание крепей горных выработок должно учитывать такие обязательные факторы:

- их надежность по деформационно-силовым характеристикам (податливость, несущая способность);
- качество изготовления и качество применения;
- долговечность, обеспечивающая безопасность;
- экономичность.

Известное выражение, что предел хитроумия – это умение управлять, не применяя силы, в контексте сформулированной задачи, трансформируется в необходимость создания крепей на базе знания сущности процессов и формы