

В.И. Бондаренко, И.А. Ковалевская, Г.А. Симанович, А.И. Коваль, А.В. Вивчаренко

## ОБОСНОВАНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ СНИЖЕНИЯ МЕТАЛЛОЕМКОСТИ РАМНО-АНКЕРНОЙ КРЕПИ ПЛАСТОВОЙ ВЫРАБОТКИ В СЛОИСТОМ МАССИВЕ СЛАБЫХ ПОРОД

### SUBSTANTIATION OF THE TENDENCIES OF METAL CONSUMPTION DECREASE FOR FRAME-ANCHOR SUPPORT OF A SEAM OPENING IN LAYERED MASSIF OF WEAK ROCKS

Приведены данные исследований НДС системы «породный массив – крепь» при отработке тонких угольных пластов, обоснована возможность снижения металлоемкости рамно-анкерной крепи на базе компьютерного моделирования для разной структуры углевмещающей толщи. Проведено сравнение двух вариантов рамно-анкерной крепи по компонентам напряжений и перемещений для рамы из СВП-27 и СВП-19, что позволит оптимизировать металлоемкость рам и трудоемкость их возведения.

**Ключевые слова:** *пластовая выработка, металлоемкость крепи, слоистый массив.*

Очевидно, металлоемкость рамной крепи на 1 погонный метр выработки можно снижать двумя путями: увеличивать шаг установки рам вдоль выработки или применять более легкие типы СВП в условиях упрочнения боковых пород анкерной крепью (рамно-анкерная крепь). Выбор наиболее целесообразного направления снижения металлоемкости крепи выполнен на основе современных представлений о механизме взаимодействия рамной податливой крепи с породным массивом и предварительных расчетов НДС системы «горный массив – крепь».

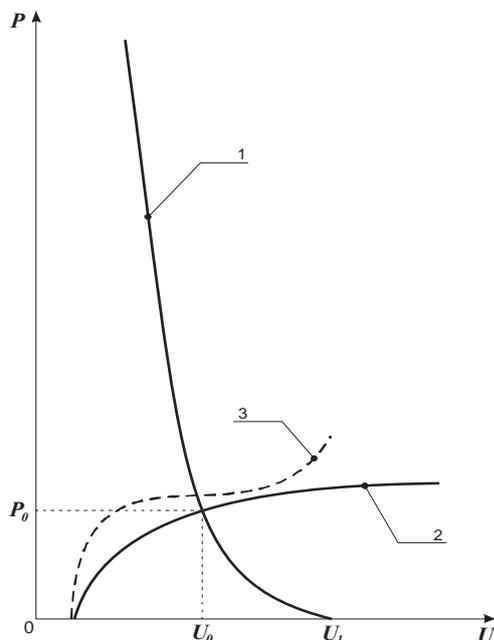


Рис. 1. Современная концепция выбора рациональной деформационно-силовой характеристик крепи (3): 1, 2 – деформационно-силовые характеристики породного массива и зоны предельного состояния приконтурных пород

Большинство ученых и специалистов едины в представлении о механизме взаимодействия рамной податливой крепи с окружающими породами, который достаточно адекватно сформулирован на базе обширных исследований последних десятилетий, как в аналитическом, так и экспериментальном плане. Основные результаты этих исследований заложены в руководящие нормативные документы по выбору крепи, начиная со СНИП II 94-80 [1] и до КД 12.01.01.201-98 [2].

Развитие процесса взаимодействия податливой крепи с приконтурными породами наглядно представлено схематически двумя общепринятыми закономерностями, показанными на рис. 1. В первой половине XX века экспериментально было установлено, что податливая крепь воспринимает значительно меньшую нагрузку, чем жесткая в одних и тех же горно-геологических условиях. Теоретическое обоснование этого факта дано в начале второй половины XX века в работах Р. Феннера [3] и А. Лабасса [4], где впервые раскрыта закономерность снижения нагрузки  $P$  на крепь с ростом величины  $U$  ее податливости. Эта закономерность (линия 1 на рис. 1) названа рядом исследователей «деформационно-силовая характеристика приконтурного массива» и используется в современных руководящих документах как обобщенный результат обширных экспериментальных и теоретических исследований. Но, если рассматривать закономерность 1 в отрыве от других геомеханических процессов в окрестности выработки, то напрашивается вывод, что при величине  $U_1$  податливости крепи можно полностью избежать нагрузки на нее. В действительности ситуация обстоит иначе, поскольку действует противоположная тенденция роста нагрузки на крепь с увеличением ее податливости (линия 2 на рис. 1). Существование данной закономерности обусловлено тем, что с развитием перемещений породного контура выработки (увеличение податливости крепи) растут размеры зоны

предельного состояния окружающих пород, которые при потере устойчивости создают своим весом нагрузку на крепь. Чем больше размеры зоны предельного состояния, тем больше формируется нагрузка на крепь при потере устойчивости близлежащего массива вследствие действия различного рода разупрочняющих факторов: трещиноватости, обводненности, реологии и т.д. Таким образом, избежать роста нагрузки на крепь в породах средней крепости, а тем более в слабых породах, практически не удается.

Действие двух взаимно противоположных закономерностей всегда генерирует минимум  $P_0$  нагрузки (в математической постановке данного явления), которая соответствует точке пересечения линий 1 и 2. Поэтому рациональная деформационно-силовая характеристика крепи должна обязательно проходить не ниже точки с нагрузкой  $P_0$  при податливости  $U_0$  (линия 3 на рис. 1), что и служит основой в современных рекомендациях по выбору крепи (конечно, с некоторым запасом по величине несущей способности). Теперь в свете указанных закономерностей проанализируем два направления снижения металлоемкости рамной крепи из спецпрофиля СВП. Увеличение шага установки рам от величины  $L_1$  до величины  $L_2$ , неминуемо приведет к росту объемов неустойчивых пород приходящихся на одну раму и, соответственно, к росту нагрузки на крепь (рис. 2) от величины  $(P_0)_1$  до величины  $(P_0)_2$ . Это, в свою очередь, уве-

личит напряжения в раме и может вызвать пластическое течение ее материала с потерей несущей способности. В руководящих нормативных документах [1, 2] принята линейная связь увеличения нагрузки на раму с ростом шага их установки вдоль выработки. Предварительные расчеты НДС системы «горный массив – крепь» при переменном шаге  $L$  установки рам подтвердили рост напряжений в крепи при увеличении  $L$ . Применительно, например, к условиям проведения откаточного квершлага по пласту  $C_6$  на ш. «Юбилейная» и закрепленного рамно-анкерной крепью по «Рекомендациям...» ИГТМ НАН Украины [5, 6] следует отметить, что стойки рам уже находятся в состоянии, близком к пределу текучести стали Ст.5, и какое-либо увеличение шага установки  $L$  рам приведет к потере несущей способности. Увеличение же номера спецпрофиля (от СВП-27 до СВП-33) не дает экономической выгоды, поскольку снижение металлоемкости от увеличения шага установки рам практически компенсируется повышением металлоемкости каждой рамы от увеличения номера СВП. Также необходимо обратить внимание на устойчивость приконтурных пород в промежутках между рамами, где растет вероятность локальных вывалов с увеличением шага установки рам. Таким образом, направление ресурсосбережения в данном конкретном случае, связанное с увеличением шага установки рам вдоль выработки, не может быть признано целесообразным.

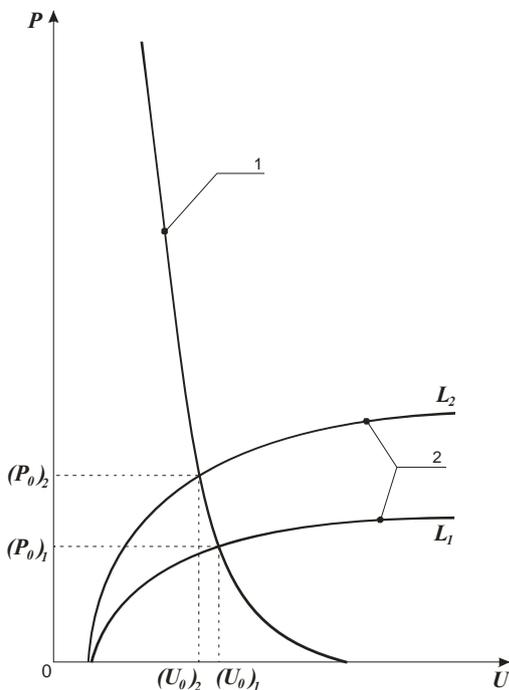


Рис. 2. К обоснованию ресурсосберегающего направления увеличения шага установки  $L$  рамной крепи: 1, 2 – деформационно-силовые характеристики породного массива и зоны предельного состояния приконтурных пород

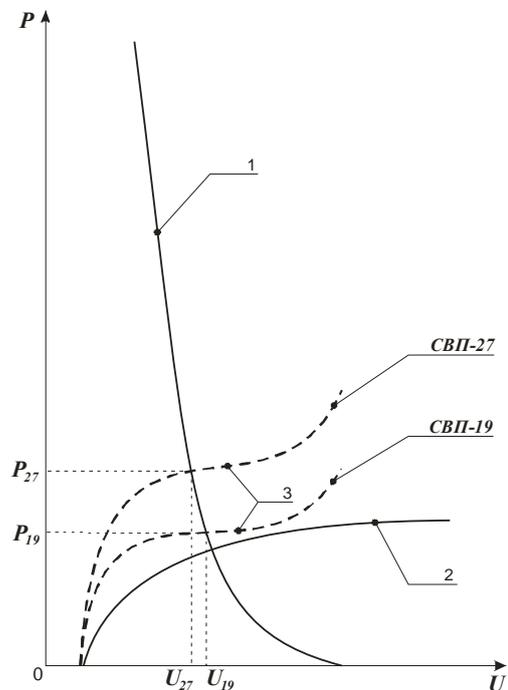


Рис. 3. К обоснованию ресурсосберегающего направления применения более легких номеров СВП для рамно-анкерной крепи: 1, 2, 3 – деформационно-силовая характеристика породного массива, зоны предельного состояния приконтурных пород и податливой крепи соответственно

Второе направление ресурсосбережения при креплении пластовой выработки рамно-анкерной крепью заключается в установке менее металлоемких рам из облегченных номеров СВП (например, вместо СВП-27 применить СВП-22 или СВП-19). В этой связи предварительное компьютерное моделирование выявило незначительное увеличение напряжений в раме при снижении номера СВП вплоть до СВП-19. Расчеты были проведены для разной структуры углевмещающей толщи, но показали постоянство результатов и потребовали геомеханического объяснения на основе современных представлений о действии двух закономерностей в формировании нагрузки на крепь.

Крепь из СВП-27 имеет более высокую несущую способность (в сравнении, например, с СВП-19) как максимальную, так и в режиме податливости, поэтому ее деформационно-силовая характеристика (линия 3 для СВП-27 на рис. 3) пересекает линию 1 на уровне действия нагрузки  $P_{27}$  и равновесное состояние системы «горный массив-крепь» устанавливается при податливости рамы величиной  $U_{27}$ . Менее металлоемкая рама из СВП-19 имеет более низкое сопротивление в податливом режиме, который продлевается до величины  $U_{19}$  наступления равновесного состояния системы, при этом нагрузка на раму  $P_{19}$  оказывается меньше, чем  $P_{27}$ . Принимая во внимание «крутой» наклон линии 1 к оси  $U$ , происходит значительное снижение нагрузки  $P$  на раму при небольшом росте ее податливости  $U$ . Тогда рама из СВП-19, имеющая более низкий момент сопротивления поперечного сечения, оказывается под влиянием меньшей нагрузки. В этой связи предварительные расчеты НДС системы «горный массив-крепь» установили такое соотношение снижения нагрузки на крепь и момента сопротивления поперечного сечения более легкого СВП, когда эти две тенденции практически компенсируют друг друга по критерию максимальной интенсивности компонент напряжений  $\sigma$  в раме. Таким образом, снижение номера СВП не приводит к существенному изменению НДС в рамной крепи, что является теоретическим обоснованием целесообразности данного направления снижения металлоемкости крепи и трудоемкости ее установки. Это положение было исследовано на геомеханических моделях с рамно-анкерной крепью [5, 6] для участка конвейерного квершлага блока №3 ш. «Юбилейная» при двух типах СВП рамы: СВП-27 и СВП-19.

Сравнение двух вариантов рамно-анкерной крепи выполнено на основе анализа НДС системы «породный массив-крепь» по компонентам напряжений и полных перемещений с анализом поля напряжений попарно для рамы из СВП-27 и СВП-19 с целью выявления существенных отличий и объяснения причин их появления.

Интегральной характеристикой НДС системы «горный массив-крепь» являются так называемые приведенные напряжения  $\sigma$  (для стали – интенсивность напряжений  $\sigma$ ), по которым производится

прочностной расчет в породе (в области действия сжимающих напряжений) и в крепи (в области как сжимающих, так и растягивающих напряжений). Поэтому представляется важным анализ различий в полях  $\sigma$  для СВП-27 (рис. 4, а) и СВП-19 (рис. 4, б).

В непосредственной кровле создается разгруженная зона с уровнем действия  $\sigma = 2,5...7$  МПа, величина которых гораздо меньше предела прочности на сжатие аргиллита (13 МПа), что обуславливает достаточно устойчивое состояние кровли.

В боках выработки образуется зона повышенных напряжений ( $\sigma = 12,5...16$  МПа) высотой до 3,2 м и шириной до 1,2 м. Эта зона по высоте захватывает аргиллит непосредственной кровли ( $\sigma_{сж} = 31,5$  МПа) и алевролит непосредственной почвы угольного пласта ( $\sigma_{сж} = 13,5$  МПа). С учетом действия ослабляющих породу факторов можно однозначно утверждать, что в непосредственной кровле и почве (в боках выработки) будет происходить разупрочнение породы с формированием повышенной боковой нагрузки на стойки рамы, что и наблюдается в шахтных условиях. Отсюда следует вывод о целесообразности анкерного упрочнения боков выработки.

Непосредственная почва подвержена разупрочнению на всю мощность слоя алевролита, а залегающий ниже песчаник ограничивает проявление пучения почвы выработки, находясь в целостном допредельном состоянии.

Отличая в эпорах  $\sigma$  приконтурных пород для рам из СВП-27 и СВП-19 практически не заметны: в непосредственной кровле и почве распределение  $\sigma$  одинаково, а размеры зоны повышенного горного давления в боках выработки увеличиваются по высоте на 1,1%, а по ширине – на 1,6%, что может быть признано незначительной разницей.

Поля напряжений  $\sigma$  в рамной крепи из спецпрофиля СВП-27 и СВП-19 (рис. 5) весьма схожи друг с другом. В верхняке действуют напряжения в интервале  $\sigma = 155...205$  МПа с появлением областей разгрузки в районе замка податливости ( $\sigma = 90...130$  МПа) и нижних волокнах сечения рамы в районе замка свода ( $\sigma = 140...155$  МПа); причем длина последнего участка несколько выше для СВП-27, что указывает на повышенное нагружение замка свода СВП-19, хотя уровень напряжений  $\sigma$  все равно остается ниже предела текучести Ст.5 в 1,5...1,9 раза. Замок податливости срабатывает на уровне  $\sigma = 30...50$  МПа и выполняет свои функции регулятора нагрузки со стороны породного массива. Стойки рамы более нагружены  $\sigma = 245...285$  МПа и на двух участках (пяты свода и опора стойки) материал находится в пластическом состоянии. Примечательно, что размеры областей пластического состояния несколько больше в СВП-27, чем в СВП-19, что может быть объяснено повышенной жесткостью более тяжелого профиля. Этот факт также подтверждает абсолютный максимум  $\sigma_{max}$  в опоре стойки:  $\sigma_{max} = 310,8$  МПа для СВП-27 и  $\sigma_{max} = 310,2$  МПа для СВП-19 (снижение на 0,2%).

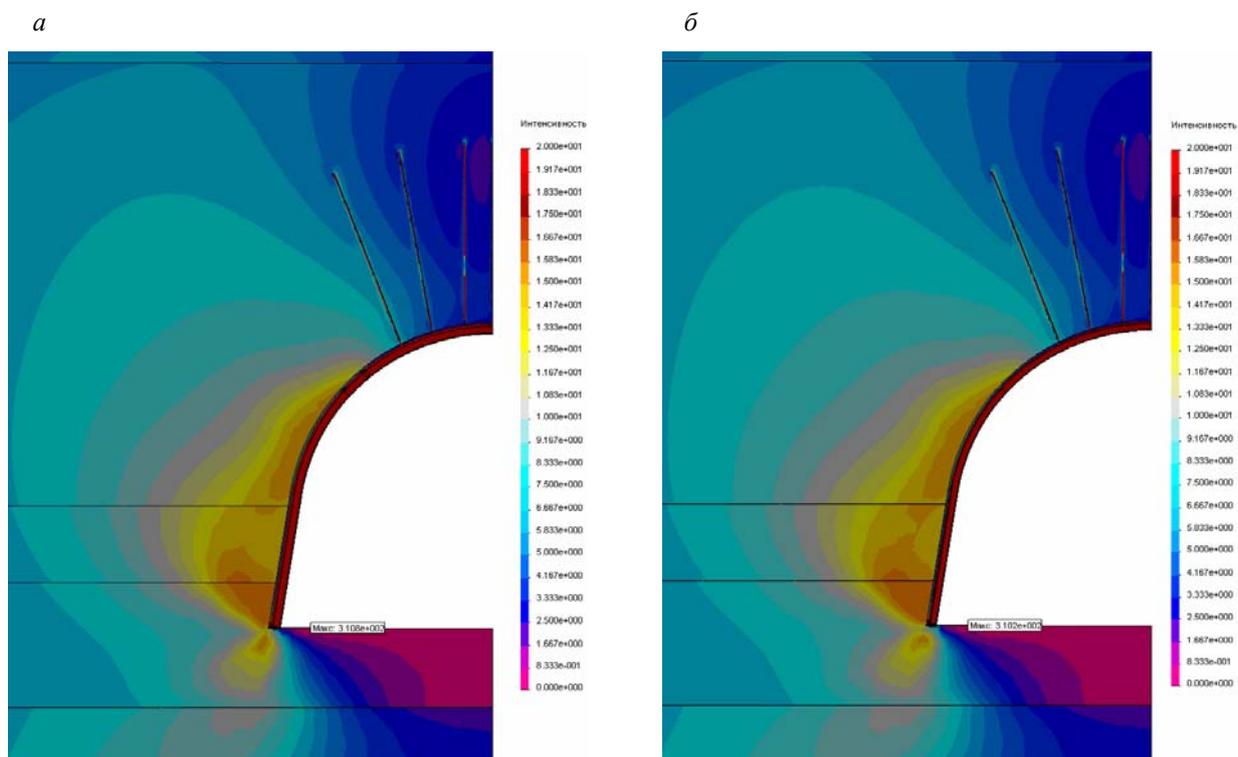


Рис. 4. Этюры приведенных напряжений  $\sigma$  в системе «горный массив – крепь» для варианта применения СВП-27 (а) и СВП-19 (б)

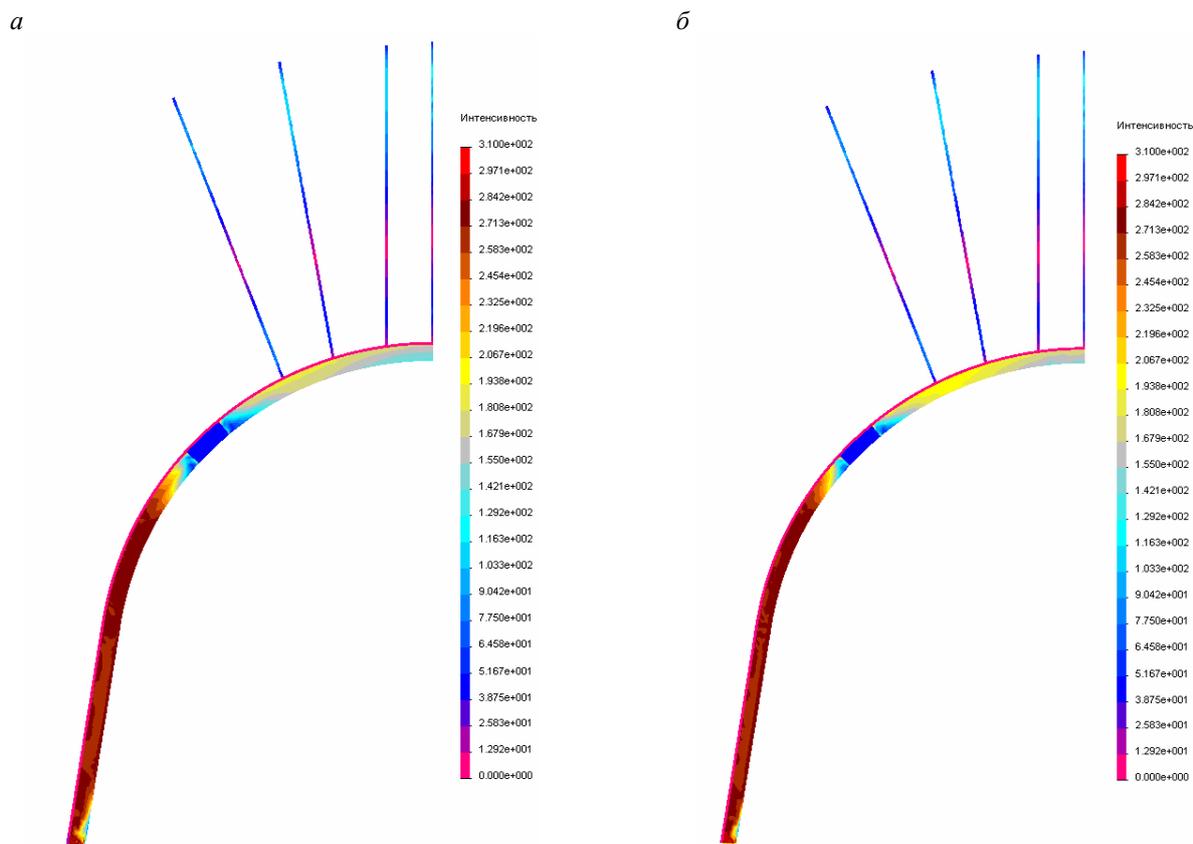


Рис. 5. Этюры приведенных напряжений  $\sigma$  в равно-анкерной крепи для варианта применения СВП-27 (а) и СВП-19 (б)

Полученные результаты говорят о необходимости усиления стоек рамы анкерной крепью с целью снижения  $\sigma$  в областях пластического состояния и их перехода в упругое состояние. Причем данное мероприятие более актуально для СВП-27, чем для СВП-19.

Арматура анкеров находится в упругом состоянии ( $\sigma = 55...100$  МПа) за исключением небольшого участка, разделяющего заглубленную и приконтурную части длины анкеров; здесь возможно появление локальных пластических областей, так как  $\sigma = 230...255$  МПа при пределе текучести арматуры  $\sigma_T = 240$  МПа. Однако при пластическом удлинении арматуры анкера нагрузка на него падает, и анкер переходит в упругое состояние.

Металлическая сетка межрамного ограждения из-за прогиба породы между соседними рамами также находится в состоянии, близком к предельному.

В целом НДС в рамно-анкерной крепи (рама, анкера, межрамное ограждение) для спецпрофилей СВП-27 на СВП-22 и СВП-19 отличается на относительно небольшую величину, что обосновывает возможность принятия технического решения по замене СВП-27 на СВП-19 на экспериментальном участке пластовой выработки по пласту  $C_6$  ш. «Юбилейная» ОАО «Павлоградуголь».

Что касается перемещений рамы в полость выработки, то в кровле оно составляет до 25 мм для СВП-27 и до 27 мм для СВП-19 (увеличение на 8,0%), в боках перемещение до 14 мм для СВП-27 и до 16 мм для СВП-19 (увеличение на 14,3%). Таким образом, происходит незначительное увеличение перемещений рамы из СВП-19 по сравнению с СВП-27.

В целом по итогам анализа напряженно-деформированного состояния системы «горный массив-крепь» можно считать целесообразным замену СВП-27 на СВП-22 и СВП-19 в рамно-анкерной крепи [5, 6] при проектировании экспериментальных участков пластовой подготовительной выработки на шахте «Юбилейная», проводимой по пласту  $C_6$ .

### Выводы

Анализ НДС системы «горный массив – крепь» установил малые различия (как правило, до нескольких процентов) в величинах компонент напряжений, особенно приведенных  $\sigma$  (по которым производится прочностной расчет), при установке рам из СВП-27 и СВП-19 в сочетании с анкерной крепью. Установка более легкого профиля позволяет сократить до 30% металлоемкость рам и в определенной степени трудоемкость их возведения.

В стойках рам образуются две области (в районах пяты свода и опоры стойки) пластического состояния металла независимо от номера СВП, для устранения которых необходимо предусматривать анкерное укрепление боков выработки.

Размеры области разупрочнения пород в боках выработки, генерирующей боковое давление на крепь, указывают на необходимость применения ан-

керов длиной не менее 1,8 м. Для определения рациональной длины анкеров необходимо провести дополнительные исследования; то же касается выбора рационального количества анкеров, координат их установки в боках и кровле выработки и конструктивных схем взаимодействия элементов рамно-анкерной крепи, что предопределяет содержание последующих исследований.

### Список литературы

1. СниП П-94-8. Подземные горные выработки. – М.: Стройиздат, 1982. – 30 с.
2. Руководящий нормативный документ Минуглепрома КД 12.01.01.201-98. Расположение, охрана и поддержание горных выработок при отработке угольных пластов на шахтах. Методические указания. – К.: УкрНИМИ, 1998. – 169 с.
3. Феннер Р. Исследование горного давления // Вопросы теории горного давления. – М.: Госгортехиздат, 1961. – С. 5-58.
4. Лабасс А. Давление горных пород в угольных шахтах // Вопросы теории горного давления. – М.: Госгортехиздат, 1961. – С. 59-99.
5. Рекомендации по параметрам рамно-анкерного крепления конвейерного квершлага блока №3 ш. «Юбилейная» ОАО «Павлоградуголь». – Д.: ИГТМ им. Н.С. Полякова НАН Украины, 2009. – 23 с.
6. Паспорт на проведение и крепление конвейерного квершлага блока №3 шахты «Юбилейная» ОАО «Павлоградуголь».

Наведено дані досліджень НДС системи «породний масив – кріплення» при відпрацьовуванні тонких вугільних пластів, обґрунтована можливість зниження металоємності рамно-анкерного кріплення на базі комп'ютерного моделювання для різної структури вуглевміщуючої товщі. Проведено порівняння двох варіантів рамно-анкерного кріплення за компонентами напружень і переміщень для рами із СВП-27 і СВП-19, що дозволить оптимізувати металоємність рам і трудомісткість їх зведення.

**Ключові слова:** *пластова виробка, металоємність кріплення, шаруватий масив.*

The researches data of stress and strain system «rock massif – support» during development of thin coal seams are given and the possibility of metal consumption decrease for frame-anchor support on the basis of computer modeling for different structure of coal containing strata is substantiated. As well comparison of two types of frame-anchor support are made according to pressure and movement components for frame support SIP-27, that will allow to optimize metal consumption of the frames and the labor input for their erection.

**Key words:** *layer mine workings, metal roof supports, layered massif.*

*Рекомендовано до публікації д.т.н. В.І. Бузилом 07.12.09*