



**И. А. КОВАЛЕВСКАЯ,**  
доктор техн. наук  
(Национальный горный  
университет)



**Г. А. СИМАНОВИЧ,**  
доктор техн. наук  
(Национальный горный  
университет)



**В. Г. СНИГУР,** канд. техн. наук  
(Шахтоуправление «Терновское»  
ПАО «ДТЭК Павлоградуголь»)



**А. С. ГУСЕВ,** инж.  
(Шахтоуправление  
«Першотравенское»  
ПАО «ДТЭК Павлоградуголь»)

УДК 622.284.74

## Обоснование и расчет канатных анкеров в крепежной системе выемочных выработок

На базе комплекса многовариантных расчетов НДС крепежной системы выемочных выработок в различных горно-геологических условиях Западного Донбасса определена целесообразность применения канатных анкеров и выполнен расчет их рациональных параметров.

Ключевые слова: анкер, расчет, свойства пород, параметры установки, упрочнение.

Контактная информация: [kovalevska\\_i@yahoo.com](mailto:kovalevska_i@yahoo.com)

**В** процессе поддержания выемочной выработки в зоне влияния очистных работ канатные анкеры выполняют такие функции:

так называемое глубинное упрочнение пород кровли, основной эффект которого состоит в уменьшении расслоения достаточно мощной структуры из пород непосредственной и основной кровли, что не только ограничивает их опускание в полость выработки, но и повышает сопротивление внешним силам горного давления;

резкое повышение несущей способности рамной крепи за счет податливых механических связей канатных анкеров и верхняков крепи. Такая комбинация грузонесущих элементов приводит к качественно иному механизму поведения окружающего массива – его совместному деформированию с крепью в режиме саморегулируемого изменения сопротивления на участках повышенного горного давления [1];

создание дополнительных опор верхняку рамы на участке демонтажа стоек в районе «окна» лавы, что исключает применение традиционных стоек крепи усиления.

Приведенные функции канатных анкеров принципиально отличаются их от сталеполимерных. Для подтверждения этого на рис. 1 приведены фрагменты расчетов НДС (эпюры интенсивности напряжений  $\sigma$ ) крепежных и охранных систем выемочных выработок на трех шахтах Западного Донбасса. Прослеживается более высокая нагруженность канатных анкеров по сравнению со сталеполимерными (в своде выработки) вне зависимости от горно-геологических условий поддержания выработки, схемы размещения анкеров и способа охраны.

В связи с указанным только для канатных анкеров разработана методика расчета рациональных параметров: длины  $l^{\text{кан}}$  канатного анкера; диаметра  $d^{\text{кан}}$  каната; координаты  $x^{\text{кан}}$  и угла  $\beta^{\text{кан}}$  наклона установки. Рациональную длину анкера выбирают по условию закрепления его замковой части за пределами свода предельного равновесия, форма которого в большинстве публикаций наиболее адекватно описывается уравнением параболы. Эти классические представления настолько аргументированы, что вошли в нормативные документы, в том числе и в отраслевой стандарт [2]. Однако при расчете высоты  $h$  свода не учтена ширина области разупрочненных пород в боках выработки. Для

устранения данного недостатка и уточнения размеров свода предельного равновесия использованы:

высота свода  $h$  предельного равновесия – определяется в соответствии с СОУ [2];

ширина области разупрочнения пород в боках выработки – по данным исследований авторов статьи;

форма контура свода – по уравнению параболы согласно шкале крепости горных пород М. М. Протодьяконова вида

$$y = h \left\{ 1 - \left[ 4x^2 / (B + 2b_l^k) \right]^2 \right\}, \quad (1)$$

где  $y$  и  $x$  – вертикальная и горизонтальная координаты с точкой отсчета, расположенной в замке свода выработки;

$B$  – ширина выработки в проходке;

$b_l^k$  – параметр, характеризующий кровлю, принят к расчету как максимальный размер ширины области разупрочнения в боку выработки со стороны лавы, что дает некоторый запас надежности вычислений при повторном использовании выработки, когда размеры параметров со стороны лавы и со стороны массива уравнивают по своим значениям,

$$b_l^k = \left\{ 4,1 I_{ox}^{0,73} / \left[ R^{0,1} (R^k)^{0,21} \right] \right\} \left[ 1 - \exp(-5,9 \cdot 10^{-3} H) \right], \quad (2)$$

$R$  и  $R_1^k$  – среднее расчетное сопротивление сжатию близлежащего породного массива кровли и непосредственной кровли;

$I_{ox}$  – ширина охранной полосы;

$H$  – глубина расположения выработки.

Приводим закрепления замковой части канатного анкера за границей свода предельного равновесия при расчете минимальной длины канатных анкеров:

$$l^{кан} = l_{зам} + l_{хв} + [(h_B - h^{кан}) / \sin \beta^{кан}] + [(Z_2 - Z_1) / \cos \beta^{кан}], \quad (3)$$

где  $l_{зам}$  и  $l_{хв}$  – длины замковой и хвостовой частей анкеров;

$h_B$  – высота выработки в проходке;

$h^{кан}$  – высота установки канатного анкера от подошвы выработки;

$\beta^{кан}$  – угол наклона канатного анкера к вертикальной оси выработки;

$Z_1$  и  $Z_2$  – вспомогательные геометрические параметры:

$$Z_1 = x^{кан} + (h_B - h^{кан}) \operatorname{ctg} \beta^{кан}, \quad (4)$$

$$Z_2 = \left[ (B + 2b_l^k)^2 / 8h \right] \times \left[ \sqrt{\operatorname{tg}^2 \beta^{кан} + \left[ 16h / (B + 2b_l^k) \right]^2} (h + Z_1 \operatorname{tg} \beta^{кан}) - \operatorname{tg} \beta^{кан} \right], \quad (5)$$

$x^{кан}$  – расстояние по горизонтали от вертикальной оси выработки до места установки канатного анкера.

Задачу выбора рациональных значений параметра  $x^{кан}$  решают, перебирая варианты расчета НДС рассматриваемой геомеханической системы. По аналогии с выбором параметров  $x_i$  для сталеполимерных анкеров [3] критерий рациональности значений – это сочетание условий максимального сопротивления канатных анкеров и минимальной нагруженности рамной крепи. Также дополнительно учитываются и работы, связанные с демонтажем стоек рам в районе «окна» лавы. При этом полуветвь верхняка опирается либо на стойку крепи усиления и гибкую продольную механическую связь с канатным анкером, либо только на последнюю. Тогда при расположении продольной гибкой связи (соответственно и канатного анкера) ближе к вертикальной оси выработки

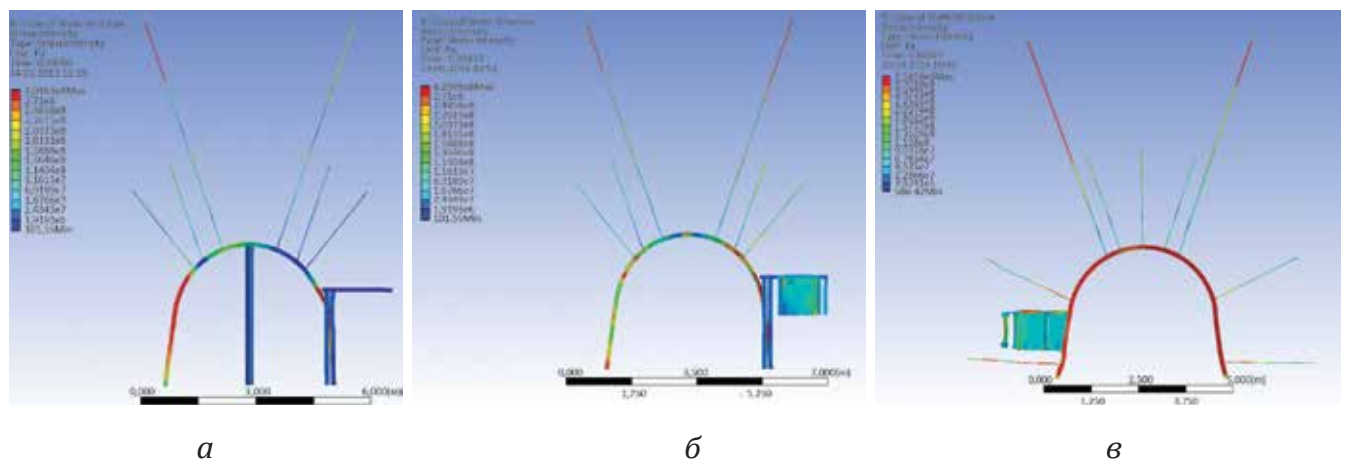
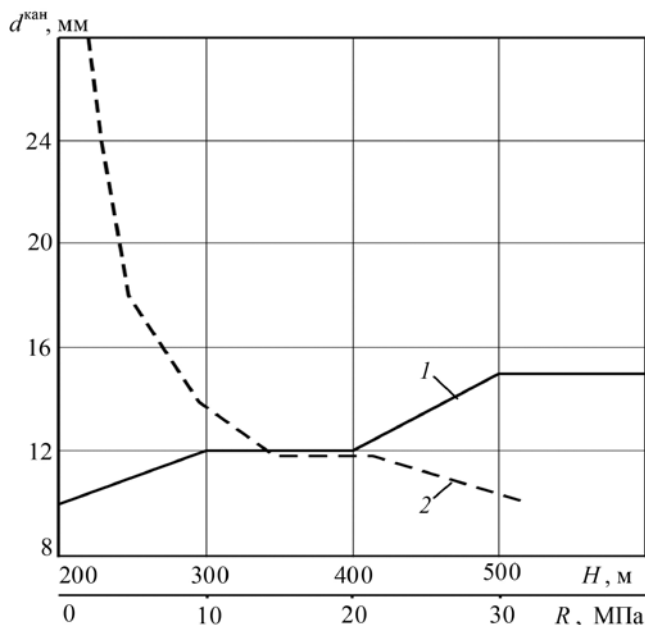


Рис. 1. Эпюры интенсивности напряжений  $\sigma$  в крепежной и охранной системах выемочных выработок шахт Западного Донбасса: а – шахта «Самарская»; б – шахта им. Героев космоса; в – шахта «Степная».



**Рис. 2.** Закономерности изменения минимально достаточного диаметра каната  $d^{\text{кан}}$  анкеров от глубины  $H$  размещения выработки (1) и среднего расчетного сопротивления сжатию  $R$  (2) близлежащего углевмещающего массива.

возникает повышенный изгибающий момент в оставшейся консольной части верхняка и возможно его пластическое деформирование в полость выработки.

Следовательно, изложенное способствует перемещению координаты установки  $x^{\text{кан}}$  расположения канатного анкера ближе к пяте свода рамы, что существенно ограничивает диапазон изменения  $x^{\text{кан}}$ . Закономерности этого изменения таковы, что влияние геомеханических параметров оценивается неоднозначно из-за действий таких противоположных тенденций:

влияние двух геомеханических параметров, определяющих размеры предельного равновесия: глубины  $H$  размещения выемочной выработки и среднего расчетного сопротивления сжатию  $R$  близлежащего массива. Сопротивляемость сжатию пород непосредственной кровли и ее мощность  $m_1^k$  – составляющие более общего показателя  $R$ , так как повышенная длина канатных анкеров влияет и на другие породные слои кровли (технически освоенная высота до 9 м). Поэтому отношение  $H/R$  наиболее полно характеризует как размеры свода предельного равновесия, так и степень сопротивления канатных анкеров опусканию кровли выработки;

влияние отношения  $H/R$  на координату  $x^{\text{кан}}$ . С одной стороны, чем больше высота свода (при увеличении параметра  $H/R$ ), тем больше нагрузка на верх-

няя рамы в его центральной части, и для активного сопротивления канатных анкеров их следует концентрировать ближе к замку свода (уменьшение координаты  $x^{\text{кан}}$ ). С другой стороны, с увеличением высоты свода одновременно растет и его ширина, т. е. увеличиваются объемы неустойчивых пород в боках выработки – соответственно возрастает нагрузка в этой части контура свода и целесообразность размещения канатных анкеров (увеличение координаты  $x^{\text{кан}}$ ). Кроме того, имеют значение еще два фактора. Первый – стойки рамы с учетом опорно-анкерной крепи, как правило, более нагружены, чем верхняя, и размещение его дополнительной опоры (в виде гибкой стяжки и канатного анкера) ближе к стойке более эффективно ее разгружает. Второй фактор уже упоминался – на участке демонтажа стоек в районе «окна» лавы снижение изгибающего момента в верхней рамы более эффективно, когда дополнительная опора размещена ближе к замку податливости рамной крепи.

В результате взаимодействия рассмотренных противоположных тенденций вполне закономерна, по мнению автора, их некоторая взаимная компенсация и стабилизация рациональной координаты установки канатных анкеров в узком диапазоне 0,8–1,1 м. Меньшее из значений  $x^{\text{кан}}$  соответствует меньшему типоразмеру площади сечения выработки (например, под крепь КШПУ-9,5), а большее – повышенному (например, под крепь КШПУ-15,0). Для наиболее применяемой площади сечения выемочных выработок под крепь КШПУ-11,7 (КШПУ-11,0) рекомендуется хвостовик канатного анкера размещать на расстоянии 1 м от вертикальной оси выработки.

Аналогичная ситуация – при определении рационального угла  $\beta^{\text{кан}}$  наклона канатного анкера к вертикальной оси выработки. Здесь действуют два главных фактора: *первый* – узкий диапазон изменения рациональной координаты  $x^{\text{кан}}$  установки канатного анкера предопределяет ограниченную вариацию значений угла его наклона; *второй* обусловлен повышенной длиной канатного анкера: по мощности кровли порядка 6–9 м вектор ее перемещений изменяется с удалением от контура в глубину кровли, интенсивность изменения направления вектора смещений пород ослабевает и в результате по длине канатного анкера наблюдается следующее.

На заглубленном конце канатного анкера (с учетом координаты его установки 0,8–1,1 м) вектор перемещений направлен под меньшим углом, чем на контуре выработки. Поэтому целесообразно задать усредненное направление канатному анкеру как среднее арифметическое из векторов перемещения массива на заглубленном его конце и на контуре вы-

работки. Это осуществили для указанного диапазона изменения координаты  $x^{\text{кан}}$  и получили интервал вариации рационального угла наклона канатного анкера  $65\text{--}80^\circ$  для разных горно-геологических условий поддержания выемочной выработки. Меньшее значение  $\beta^{\text{кан}}$  соответствует  $x^{\text{кан}} = 1,1$  м и более благоприятным горно-геологическим условиям, большее значение  $\beta^{\text{кан}} - x^{\text{кан}} = 0,8$  м и более сложным горно-геологическим условиям.

Последний из искомых параметров канатных анкеров – рациональное значение их сопротивления сдвиганию пород кровли, которое выражается через минимально достаточный диаметр «арматуры» канатного анкера  $d^{\text{кан}}$ . Критерий выбора рациональных значений – прежний (как и для сталеполимерных анкеров [3]) и его сущность – в реализации максимально возможной загрузки каната анкера в пределах допустимых напряжений на разрыв.

Анализ результатов многовариантных вычислительных экспериментов показал, что наиболее существенно на степень загрузки анкеров влияют два геомеханических параметра – глубина  $H$  размещения выработки и среднее расчетное сопротивление сжатию  $R$  близлежащей углевмещающей толщи, а отношение  $R_1^k/m_1^k$  определенно влияет только в диапазоне  $R_1^k/m_1^k \leq 0...15$  МПа/м.

В указанном диапазоне отношения  $R_1^k/m_1^k$  существенно изменяется  $R$ , так как непосредственная кровля повышенной мощности ближе всего расположена к выработке и согласно нормативам [2] максимально влияет на среднее расчетное сопротивление массива сжатию. Поэтому параметр  $R$  автоматически зависит от низких значений отношения  $R_1^k/m_1^k$ , т. е. нет необходимости отдельно изучать и фиксировать влияние этого параметра на степень перенагруженности канатных анкеров. Отмеченные закономерности, а также то, что влияние каждого из оставшихся геомеханических параметров ( $H$  и  $R$ ) необходимо устанавливать отдельными зависимостями, поскольку отношение  $H/R$  не дает достаточно тесной корреляционной связи, подтверждают результаты выполненных вычислительных экспериментов.

По итогам проведенных исследований получены зависимости связи минимально достаточного диаметра каната анкера с геомеханическими параметрами  $H$  и  $R$  (рис. 2). Как видно из рис. 2, увеличение  $d^{\text{кан}}$  с ростом глубины  $H$ , – близко к линейному, обратно пропорциональная связь  $d^{\text{кан}}$  и параметра  $R$  – ярко выражена. Основной диапазон изменения минимально достаточного диаметра канатного анкера ограничен  $15\text{--}16$  мм, что хорошо коррелирует с шахтными наблюдениями по оценке устойчивости выработок, в кровле которых установлены канатные анкера

диаметром  $15,2$  мм. Однако при весьма низком значении  $R \leq 5...7$  МПа резко возрастает нагрузка на канатные анкера (интенсивно расширяются границы свода предельного равновесия). Для этого необходимо увеличивать диаметр их каната до  $20\text{--}28$  мм в рассматриваемой схеме установки.

Обработка результатов многовариантных расчетов позволила получить уравнение регрессии для прогнозирования минимально достаточного диаметра каната:

$$d^{\text{кан}} = (139/\sqrt{\sigma^b})\{(1,7 + 9,1 \cdot 10^{-3}H)[(14,3/R^{1,8}) + 0,66]\}^{0,5}. \quad (6)$$

Уравнение (6) получено при рассмотрении варианта установки двух канатных анкеров в поперечном сечении с шагом  $L^{\text{кан}} = 3,2$  м вдоль выработки, т. е. в межрамном пространстве через каждые три рамы на четвертую, которые, в свою очередь, устанавливаются с шагом  $L = 0,8$  м. С другой стороны, канатные анкера выпускают стандартных диаметров  $d_{\text{ст}}^{\text{кан}}$  (самый распространенный равен  $15,2$  мм) с ограниченным количеством типоразмеров. Поэтому, если расчетное значение  $d^{\text{кан}}$  по формуле (6) позволяет выбрать ближайший больший типоразмер  $d_{\text{ст}}^{\text{кан}}$ , то именно его используют в крепежной системе выемочной выработки. Если расчетное значение  $d^{\text{кан}}$  превышает стандартное значение  $d_{\text{ст}}^{\text{кан}}$  канатов, имеющих в наличии, то увеличивается количество канатных анкеров на  $1$  м выработки:

$$n^{\text{кан}} = 0,625(d^{\text{кан}}/d_{\text{ст}}^{\text{кан}}). \quad (7)$$

**Выводы.** Результаты многовариантных вычислительных экспериментов НДС геомеханической модели массив–рама–анкер и их корреляционно-дисперсионный анализ позволили определить все параметры, необходимые для эффективного поддержания кровли выемочной выработки канатными анкерами.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бондаренко В. И. Геомеханика взаимодействия анкерной и рамной крепей горных выработок в единой грузонесущей системе / [В. И. Бондаренко, Ю. Я. Чердниченко, И. А. Ковалевская и др.]. – Днепропетровск: ЛизуновПресс, 2010. – 174 с.
2. Підготовчі виробки на пологих пластах. Вибір кріплення, способів охорони: СОУ 10.1.00185790.011:2007. – Донецьк: ДонВУГІ, 2008. – 114 с. – (Нормативний документ Мінвуглепрому України. Стандарт).
3. Гусев А. С. К вопросу снижения металлоемкости анкерного упрочнения кровли выемочных выработок / А. С. Гусев // Уголь Украины. – 2014. – № 11. – С. 8–10.