

ВЛИЯНИЕ ПРОЧНОСТИ ЗАКРЕПЛЕНИЯ АНКЕРОВ НА ФОРМИРОВАНИЕ НЕСУЩЕГО ПЕРЕКРЫТИЯ В КРОВЛЕ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ

У статті розглянуто особливості формування опорного перекриття у покрівлі виробки, яке утворюється анкерами високої несучої здатності. Розглянуто вплив міцності встановлення анкерів на параметри опорного перекриття. Виконано аналіз отриманих результатів та сформульовані рекомендації, які необхідно використовувати при встановленні анкерів та проектуванні паспортів кріплення гірничої виробки.

THE INFLUENCE OF STRENGTH OF ANCHORS FIXING ON ABUTMENT OVERLAPPING FORMATION IN ROOF OF EXCAVATION

In the article research formation of abutment overlapping in a roof with anchors of high bearing capacity. The influence of a roof-bolt strength setting on parameters of abutment overlapping surveyed. The analysis of obtained results is executed and recommendations which are necessary for taking into account at projection of support patterns of mine workings are formulated.

В настоящее время на шахтах Украины все в больших масштабах применяются анкера нового поколения. Основное их отличие от ранее применяемых анкеров состоит в том, что полимерный закрепитель в широком спектре горно-геологических условий обеспечивает прочность закрепления штанги в шпуре большую, чем разрывная прочность (от 250 до 500 кН) самой стальной штанги.

Опыт применения таких анкеров показал их высокую эффективность, смещения породного контура выемочных штреков с момента возведения крепи в проходческом забое и вплоть до окна лавы в условиях пород II-IV категорий устойчивости удается удержать на уровне 20-50 мм.

На базе известных теорий работы анкеров [1, 2, 3], которые учитывают только такие параметры крепи, как длина и несущая способность анкеров, плотность их установки, не представляется возможным дать объяснения наблюдаемому на практике столь существенному повышению устойчивости горной выработки. Кроме того, любые расчетные оценки плотности установки анкеров, необходимой для удержания смещений в пределах нормативных требований в условиях пород III-IV категорий устойчивости, дают неприемлемую для практики величину – 2,5-5 анкеров на квадратный метр обнажения. Установка такого количества анкеров в проходческом забое неприемлема из-за резкого падения темпов проведения выработок. О выполнении этих работ за пределами проходческого забоя не может быть и речи, поскольку даже при небольшом отставании крепления от забоя, как показала практика, сводятся на нет все преимущества анкерной крепи.

В этой связи, для поиска путей сокращения затрат и расширения области применения анкерной крепи крайне важно более глубоко изучить и понять роль и механизмы влияния ее основных параметров на характер и интенсивность развития процесса смещений пород в выработку.

Основными факторами, определяющими устойчивость системы «крепь-

массив горных пород», являются:

- горно-геологические условия заложения и эксплуатации выработки (категория устойчивости вмещающих пород, устойчивость породного обнажения в забое выработки, слоистость и др.),

- горнотехнические условия проведения и эксплуатации выработки (ширина, высота и форма поперечного сечения выработки, назначение, темпы проведения выработки, отставание места установки крепи от груди забоя, близость очистных работ и др.),

- параметры крепления (деформационно-силовые характеристики).

В зависимости от конкретных условий проведения и эксплуатации горных выработок во вмещающем породном массиве возникает и с различной интенсивностью развивается процесс их разрушения, который, как правило, происходит с разупрочнением и разрыхлением приконтурных пород. Размеры области разрушения, степень потери несущей способности пород в ней полностью определяют величину смещения породного контура, а значит и устойчивость выработки [4].

Проведенными многочисленными исследованиями показано, что конструкции податливой рамной металлической крепи горных выработок не способны предотвращать обрушение нарушенных приконтурных пород. Пропорционально создаваемому ими отпору они только ограничивают величину разрыхления. Для любого в малейшей степени значимого воздействия пород на процесс их разупрочнения, а значит и на величину зоны разрушения пород вокруг выработки, создаваемый ими отпор должен быть увеличен в десятки, сотни и даже в тысячи раз, что не реально. Никакие технические решения по данному виду крепи, с помощью которых в тяжелых условиях можно было бы значительно уменьшить зону разрушенных пород, не могут дать столь существенных положительных результатов, как анкерная крепь.

Проведенными тестовыми испытаниями на выдергивание закрепленного анкера установлено, что современные полимерные закрепители штанг дают прочность на выдергивание от 2 до 20 кН/см. Такие значения показателя прочности закрепления штанг в шпуре обеспечивают превышение суммарной прочности закрепления штанги над разрывной прочностью самой стальной штанги.

Вместе с тем современными теориями работы анкерной крепи совершенно проигнорировано наличие такого фактора и не изучена его роль в формировании грузонесущей способности крепи, неясно, как сказывается на работоспособности крепи такой разброс прочности закрепления анкера, и до каких значений целесообразно его повышать.

В связи с этим появилось такое понятие, как качество закрепления анкеров. И опыт применения показал, что в выработках, имевших смещения контура 200-300 мм, с качественной установкой анкерной крепи эти смещения не превышали 25 мм.

На выбор количества анкеров влияет десяток факторов. Среди них категория устойчивости приконтурных пород, ширина выработки, слоистость, форма выработки и т.д. Но благодаря каким факторам происходит простое монотон-

ное увеличение характеристик, а какие факторы приводят к качественному изменению поведения приконтурных пород? Например, из-за каких параметров приконтурные породы третьей категории устойчивости, с установкой анкеров, постепенно начинают переходить во вторую, а затем в первую? Если взять плотность анкеров, то можно сказать, что этот фактор относительный. Так, для ряда случаев, исходя из расчетов, необходимо устанавливать анкера с расстоянием между ними 0,5 м, а это 4 анкера/м² на квадратный метр. На это пойдет большое количество металла и трудозатрат. Это нереально. Технически разумный предел, когда между анкерами расстояние 0,7 м, что соответствует плотности 2 анкера/м².

Одним из основных параметров анкерной крепи является прочность закрепления его основного элемента – анкерной штанги в шпуре. Наряду с прочностными характеристиками элементов крепи она оказывает существенное влияние на несущую способность создаваемого с ее помощью перекрытия, поскольку без обеспечения достаточной прочности закрепления анкер не только не будет воспринимать нагрузку со стороны массива, но таким образом, не будет полностью использоваться прочностной потенциал анкерного стержня.

Таким блокирующим фактором является качество закрепления ($P_{зак}$), определяющим сдвиговую прочность закрепителя. Так, технологически удобно поставить высокого качества анкера с плотностью 1 анкер/м². Это было бы идеально. Такой анкер, с высоким качеством закрепления, гарантирует перевод приконтурных пород в первую категорию устойчивости. Но об этом нигде не говорится. Расчеты показывают, что это возможно. Постепенно с повышением качества закрепления анкеров, приконтурные породы горной выработки переводятся на более высокие категории устойчивости. Параметр качества закрепления выступает решающим фактором анкерного крепления. При высоком качестве закрепления плотность анкеров значительно уменьшается.

Благодаря высокому качеству закрепления снимается влияние других факторов, таких как слоистость, категория приконтурных пород, фактор времени и многие другие. И гарантируется, что выработка будет устойчива и сохранит свою форму.

Одним из основных параметров, влияющих на работоспособность анкерной крепи, является прочность закрепления анкерных штанг. Поэтому этот параметр необходимо учитывать при расчете анкерной крепи нового поколения.

Рассмотрим влияние различных факторов на прочность закрепления анкерных штанг и формирование грузонесущего перекрытия в кровле выработки. К таким факторам относятся как сами элементы анкерной крепи, так и параметры приконтурных пород горного массива и элементы технологии установки анкерных систем.

Важным условием прочного закрепления анкера в шпуре является время его установки. Анкера должны быть установлены после образования обнажения возможно быстрее и ближе к забою. При установке анкерной штанги с начальным натяжением в неразрыхленную породу, она сразу же включается в работу и сохраняет монолитное состояние закрепляемых ею горных пород. Если же

данное условие не выполняется, и анкер закрепляется в разрыхленной и расслоившейся горной породе, то в кровле выработке не формируется грузонесущее перекрытие. В данном случае анкерная штанга просто сшивает разрыхленные слои или подвешивает их к верхним, более прочным слоям, в зависимости от геологического строения приконтурного массива.

В горных выработках с шириной от 2,5 м до 7 м опоры, созданные анкерами, эффективно взаимодействуют, и создается перекрытие, если смещение кровли не превышает 20-30 мм. В зависимости от категории устойчивости количество анкеров в ряду должно быть увеличено для соблюдения этого критерия.

Для быстрого и прочного закрепления анкеров требуется более совершенные полимерные закрепители. Эффективность таких закрепителей, как отмечалось выше, зависит от комплексного взаимодействия многих параметров. Так, качественный полимер способен обеспечить сопротивление до 3 кН и более на 1 мм длины закрепления [6]. Однако рассматривать изолированно сам закрепитель не имеет смысла. Поэтому, чтобы оценить прочность закрепления, и изучить совместную работу анкерной штанги и полимерного закрепителя, на практике при помощи специального домкрата проводят испытания на выдергивание анкера, закрепленного в шпуре. Это может быть как полное выдергивание 30 см образца, так и нагружение реального анкера для получения характеристик закрепления. Полученные при таких испытаниях данные в дальнейшем используются для моделирования и расчетов анкерных систем.

Прочность закрепления $P_{зак}$ определяется прочностью полимерного закрепителя на сдвиг и изменяется от 0,5 до 5 кН/мм.

Для исследования влияния прочности закрепления анкерных штанг на формирование несущего перекрытия в кровле горной выработки проведем вычислительный эксперимент. Моделирование проведем с применением численных методов расчета [7].

Наиболее универсальным численным методом решения геомеханических задач является метод конечных элементов [8, 9], который позволяет учитывать форму поперечного сечения горных выработок, сложные граничные условия и разнообразные свойства геоматериалов. Суть данного метода состоит в минимизации полной потенциальной энергии, выраженной через конечное число узловых параметров, что приводит к замене системы дифференциальных уравнений системой обыкновенных алгебраических уравнений.

Все внешние и внутренние силы, граничные и начальные условия приводятся к узлам. Отсутствие перемещений в каком-либо направлении учитывается заданием жестких связей.

Расчетная схема представлена на рис 1. Задача решается в плоской упруго-пластической постановке. Для характеристики прочностных свойств горных пород применяется пластическая модель на основе теории прочности Кулона – Мора.

Размер исследуемой прямоугольной области горного массива: 60 х 60 м, на краях которой заданы граничные условия, запрещающие их перемещения в перпендикулярных направлениях. Расчеты проводились с двумя вариантами

глубин расположения выработки. Для первого варианта начальное напряжение в горном массиве $\sigma_0 = 20$ МПа, что соответствует глубине заложения выработки равной $H = 800$ м. Для второго $\sigma_0 = 25$ МПа (глубина $H = 1000$ м). Материал массива – изотропная среда с параметрами: $E_m = 2 \cdot 10^5$ МПа, $\nu_m = 0,2$, $\sigma_{сж}^{ост} = 20$ МПа.

В центре области расположена выработка прямоугольной формы $4,5 \times 3$ м. В кровле выработки установлены анкера. Параметры анкера: $E_a = 204$ ГПа, диаметр 22 мм.

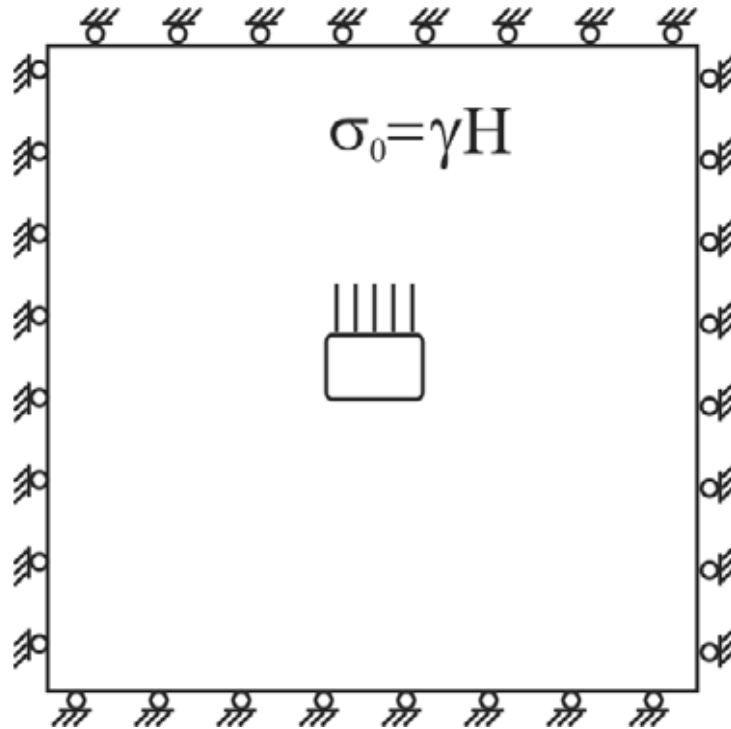


Рис. 1 - Расчетная схема задачи.

При разбиении исследуемой области на конечные элементы горный массив с проведенной в нем выработкой аппроксимируется трехузловыми треугольными конечными элементами. Анкера аппроксимируются двухузловыми стержневыми конечными элементами. Причем для моделирования многоточечного взаимодействия анкера с горным массивом, каждый анкер разбивается на несколько, последовательно расположенных, стержневых конечных элементов, контактирующих с конечными элементами массива в узловых точках.

Для оценки режима разрушения горных пород вблизи выработки и оценки ее устойчивости наиболее информативным показателем является отношение разности наибольших (σ_1) и наименьших (σ_3) главных напряжений к напряжениям, вызванным весом вышележащей толщи горных пород, характеризующее возможность возникновения разрушения:

$$Q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\gamma H}, \quad (1)$$

где h – высота вышележащей толщи горных пород; γ - ее удельный вес.

И отношение наименьших (σ_3) главных напряжений к напряжениям, вызванным весом вышележащей толщи горных пород, характеризующее возможный режим разрушения:

$$P = \frac{\sigma_3}{\gamma H}. \quad (2)$$

Анкерная крепь представляет собой пространственную систему закрепленных в шпурах анкерных штанг. Основная задача при установке в приконтурный массив системы анкеров - добиться такой их плотности размещения, при которой созданные анкерами опоры максимально эффективно взаимодействовали между собой. И при этом совместно с другими элементами крепи препятствовать смещению приконтурного массива внутрь горной выработки, повышая, таким образом, ее устойчивость.

Вначале рассмотрим влияние параметров одиночного анкера, закрепленного в шпуре по всей длине затвердевшим полимерным композитом, на изменения напряженного состояния в породном массиве, и определим условия формирования вокруг него породной опоры.

Сопоставление результатов расчета напряжений в горных породах призабойной части выработки без анкеров и с одним анкером показало, что с установкой анкера, некоторый объем связанных с ним пород кровли выработки удерживается от смещений. При отходе забоя породы этой области вокруг анкера не разгружаются и остаются в сжатом состоянии. На удалении от анкерной штанги развитие процессов в породном массиве происходит аналогично выработкой без анкера. Из полученных результатов следует, что чем больше размер этой области, тем более сильное влияние анкера на устойчивость выработки.

На рис. 2 представлены результаты вычислительных экспериментов, в которых прочность закрепления одиночного анкера изменялась от 1 до 4 кН/мм.

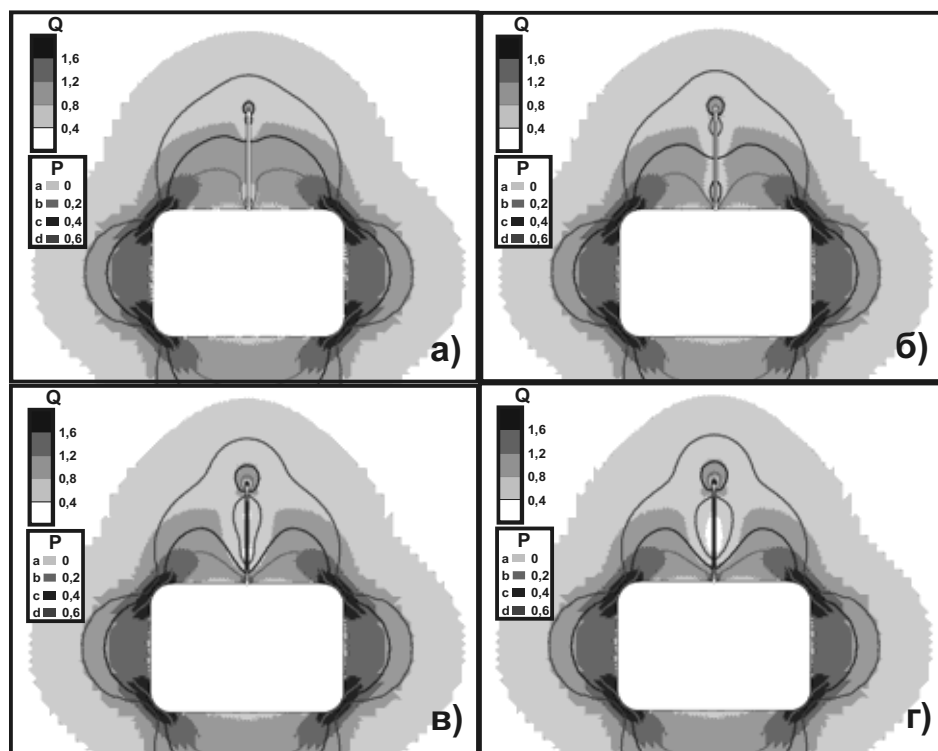
Также были проведены вычислительные эксперименты с различными длинами анкерной штанги при фиксированной прочности ее закрепления.

Анализ данных, полученных из вычислительных экспериментов, показывает, что радиус опоры при малой длине штанги линейно зависит от прочности закрепления, а с увеличением зависимость становится степенной. Исходя из такого характера зависимости выбран вид аппроксимирующей функции:

$$R_0 = \left(a + b \left(\frac{P_a - 1}{4} \right) \right) \left(\frac{L_a - 1,8}{2} \right)^{d * S + 1},$$

где a , b – параметры аппроксимации, определяющие влияние свойств приконтурных пород горного массива, $a = 7,5$; $b = 14$; P_a - прочность закрепления ан-

керной штанги; L_a - длина анкерной штанги; d – параметр аппроксимации, $d = 0,1$; S - параметр аппроксимации, зависящий от прочности полимерного закрепителя, изменяется от 0,2 до 0,6 .



а) $P_{зак}=1$ кН/мм, б) $P_{зак}=2$ кН/мм, в) $P_{зак}=3$ кН/мм, г) $P_{зак}=4$ кН/мм

Рис 2 - Распределение параметров Q и P вокруг горной выработки с одним анкером, закрепленным в шпуре с различной прочностью

На основании приведенной зависимости радиуса породной опоры от длины и прочности закрепления анкерной штанги в шпуре определены условия ее формирования.

Таким образом, горные породы в окрестности анкерной штанги приобретают свойства опоры, если в них после ее установки сохраняется упруго напряженно-деформированное состояние, практически неизменное относительно нетронутого массива, что достигается установкой штанг длиной более 1,85 м при прочности их закрепления более 1 кН/мм. При этом радиус опоры является степенной функцией с основанием, функционально зависящим от прочности закрепления анкера в шпуре, и показателем – от его длины

Для определения влияния прочности закрепления анкеров на формирование опорного перекрытия на основании представленной расчетной схемы проведен ряд расчетов для двух вариантов глубины расположения выработки, и с установкой в кровле выработки анкеров стандартной длины закрепления $l_a=2,25$ м (полная длина равна 2,4 м) в количестве от 5 до 9, что соответствует плотности установки от 0,5 до 1 анк./м в одном ряду. Прочность закрепления анкеров составляла 0,5 кН/мм, 1,5 кН/мм, 2,0 кН/мм и 4,0 кН/мм. На рис. 3 представлено распределение параметров Q и P вокруг горной выработки расположенной на

глубине 800 м.

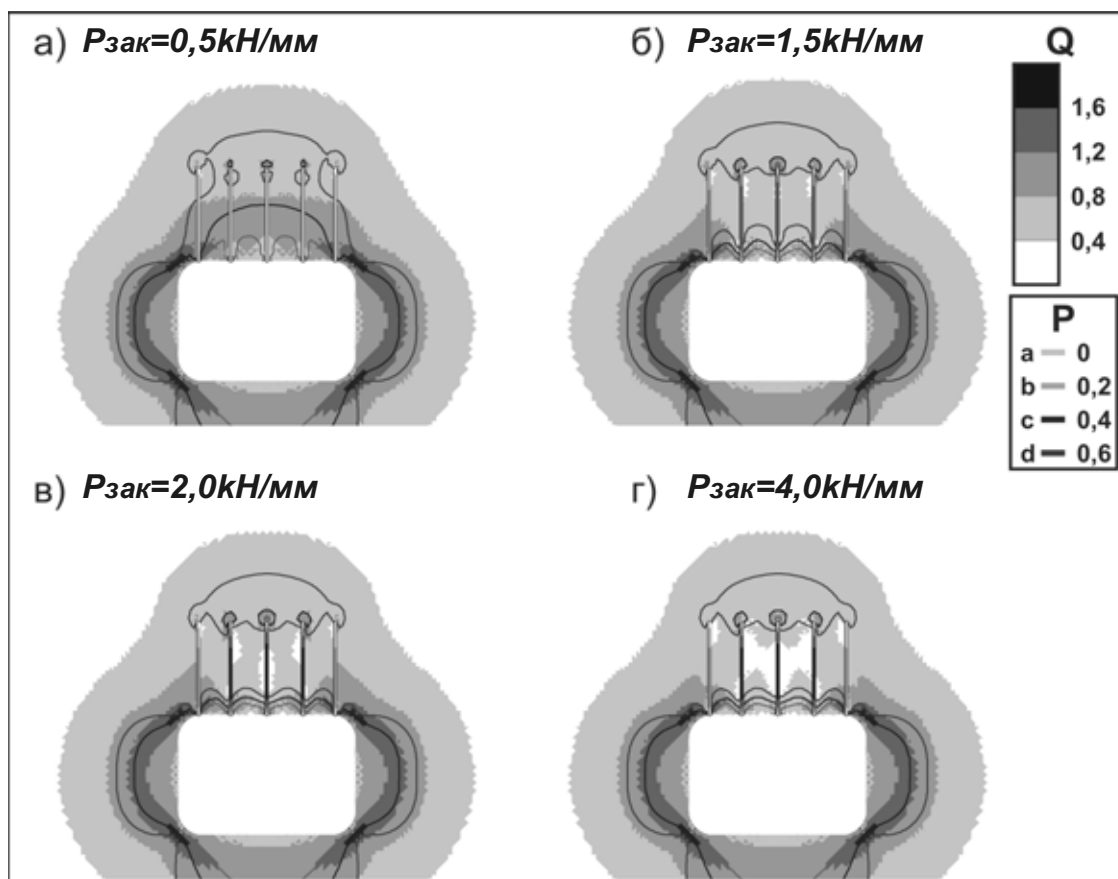


Рис. 3 - Распределение параметров Q и P вокруг горной выработки при различной прочности закрепления анкеров

Для оценки состояния, в котором находятся горные породы, в механике горных пород применяется параметр Лоде-Надаи, вычисляемый по формуле:

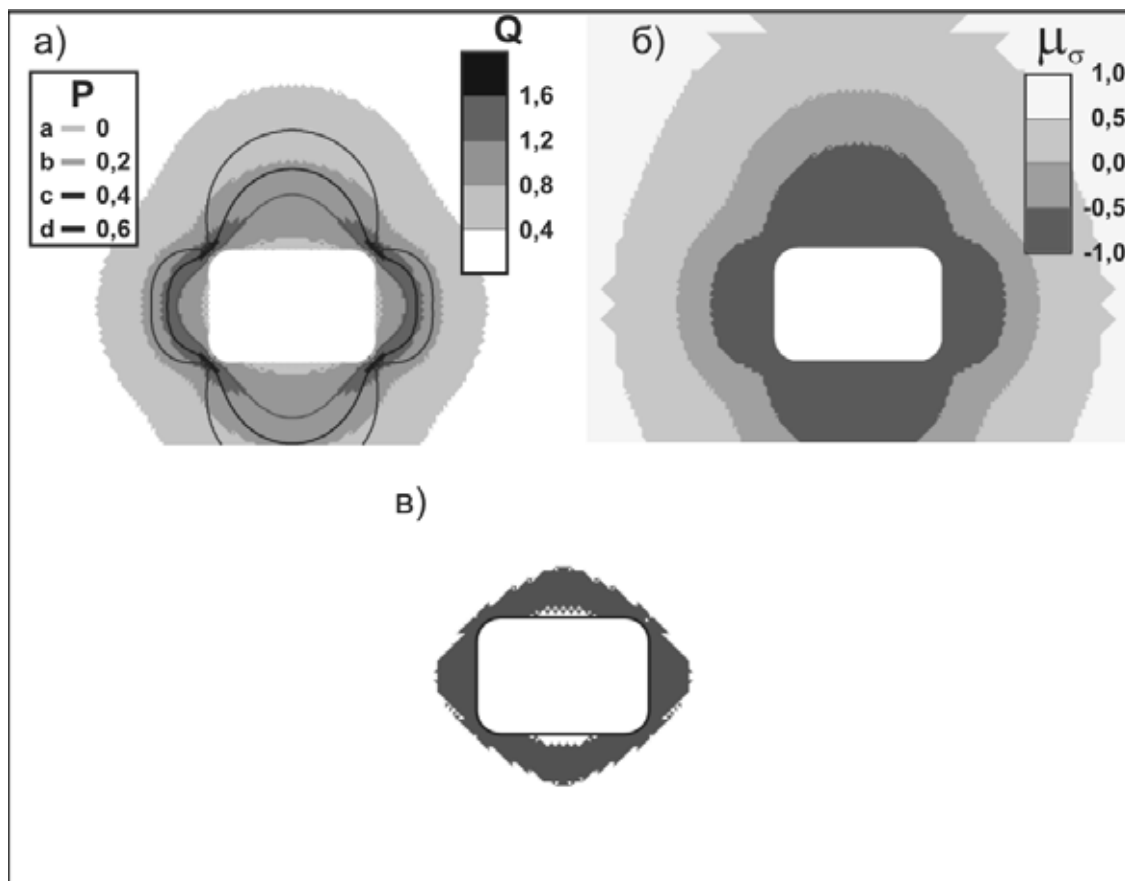
$$\mu_{\sigma} = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}. \quad (3)$$

Значение его изменяется от -1 до 1, и он характеризует вид напряженного состояния. Так, при $\mu_{\sigma} = 1$ реализуется обобщенное сжатие, при $\mu_{\sigma} = 0$ - обобщенный сдвиг, а при $\mu_{\sigma} = -1$ - обобщенное растяжение. На рис. 4 представлено распределение параметра Лоде-Надаи вокруг одиночной незакрепленной выработки.

Из представленной схемы (рис. 4-б) видно, что приконтурный массив находится в состоянии обобщенного растяжения, и в этой области параметр $\mu_{\sigma} = -1$. Минимальная компонента главных напряжений (параметр P) имеет значение близкое к нулю (рис. 4-а). Поэтому при невысокой прочности горных пород, в приконтурной зоне, где выполняется условие [2]

$$\sigma_3 < 0,15\sigma_{сжс}, \quad (4)$$

происходит их разупрочнение и разрыхление. Данное значение минимальной компоненты главных напряжений является пороговым. Превышение его блокирует возможность возникновения разрушения.



а) параметров Q и P, б) параметра Лоде-Надаи, в) области неупругих деформаций
 Рис. 4 - Распределение вокруг одиночной незакрепленной горной выработки

По мере удаления от контура выработки в глубину массива минимальная компонента главных напряжений возрастает. Условие (4) перестает выполняться и возможность возникновения разупрочнения в этой области блокируется. Увеличивается и значение параметра Лоде-Надаи. Горные породы массива в этой области находятся в состоянии обобщенного сдвига.

Затем, по мере удаления в глубину массива, параметр Лоде-Надаи продолжает увеличиваться, и на расстоянии, где влияние выработки не сказывается, он равен 1. Величина минимальной компоненты главных напряжений достигает своего максимального значения ($P=1$). Здесь, в зоне "нетронутого" массива горные породы находятся в состоянии обобщенного сжатия.

При установке анкеров картина распределения параметра Лоде-Надаи меняется. На рис. 5 приведено распределение этого параметра в зависимости от прочности закрепления анкеров и их количества.

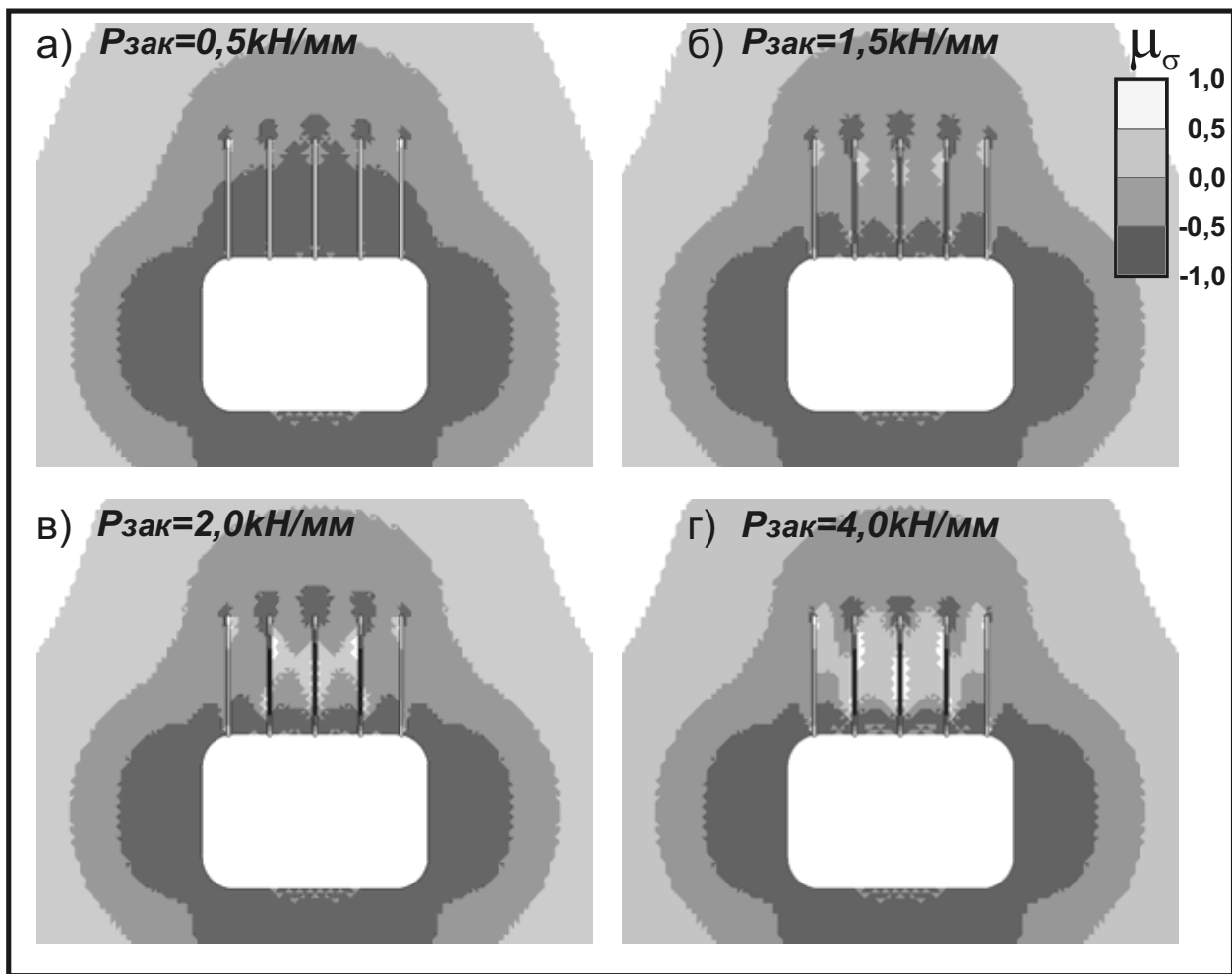


Рис. 5 - Распределение параметра Лоде-Надаи вокруг горной выработки при различной прочности закрепления анкеров

Если прочность закрепления анкерных штанг в кровле недостаточная, например $P_{зак}=0,5$ кН/мм (рис.5-а), то породы кровли по-прежнему остаются в состоянии обобщенного растяжения. Если воздействие анкеров, при такой прочности закрепления, не создает условия, чтобы величина минимальной компоненты главных напряжений в приконтурных породах превысила значение, определенное в (4), то возможность возникновения разупрочнения и разрушения остается. Анкера в таком случае будут просто подвешивать разрушенные горные породы приконтурного массива кровли к вышележащим слоям.

При большей прочности закрепления анкеров эффект образования грузонесущего перекрытия усиливается. Состояние пород в кровле выработки при своевременной установке анкеров и прочности закрепления 1,5 кН/мм (рис.5-б) характеризуется как обобщенный сдвиг со значением $-0,6 \leq \mu_\sigma \leq 0,1$. Величина минимальной компоненты главных напряжений (рис. 4-б) блокирует возможность возникновения разупрочнения и разрушения. Далее, при прочности закрепления анкеров 2,0 кН/мм (рис.5-в), состояние пород также характеризуется как обобщенный сдвиг, но уже со значением $-0,52 \leq \mu_\sigma \leq 0,3$. Величина минимальной компоненты главных напряжений имеет более высокое значение (рис. 4-в).

С увеличением плотности анкеров значения параметра Лоде-Надаи (рис. 5-г) и минимальной компоненты главных напряжений (рис. 4-г) возрастают еще больше. Так, появляются даже отдельные области со значением параметра μ_σ , близким к 1, что соответствует состоянию обобщенного сжатия. Такое состояние близко к естественному состоянию пород в горном массиве, не подверженном влиянию горных работ.

Таким образом, качество сформированного грузонесущего перекрытия при качественной установке анкеров характеризуется видом напряженного состояния (μ_σ) и значением минимальной компоненты главных напряжений (параметр Р).

На основании проведенных исследований можно прийти к выводу, что если прочность закрепления анкеров недостаточна, то опорно-анкерное перекрытие не будет сформировано, даже с учетом того, что несущая способность анкерных штанг будет большой.

Включение в работу штанги с высокой несущей способностью напрямую зависит от прочности ее закрепления. Если прочность закрепления меньше 1 кН/мм, то штанга не может быть нагружена до своих рабочих нагрузок. Штанга включается в работу только при прочности ее закрепления свыше этого порогового значения, и работоспособность ее возрастает в степенной зависимости от этого показателя, достигая максимума при прочности закрепления 5 кН/мм. Поскольку существующие полимерные закрепители могут обеспечить прочность закрепления не более 3 кН/мм, целесообразно разработчикам провести исследования и найти рецептуры, которые позволят достигнуть прочности закрепления 5 кН/мм.

Таким образом, совокупность опор формирует породно-анкерное перекрытие, если они способны ограничить смещения пород в выработку в промежутке между ними величиной не больше 20 -30 мм, что для широкого спектра горно-геологических условий проведения горных выработок достигается применением системы анкерных штанг несущей способности 300 – 900 кН и длиной 2,4 – 3 м с плотностью 1 – 2,5 анкера/м² и прочностью закрепления не менее 3 – 5 кН/мм. Минимальное количество анкеров, при котором создается породно-анкерное перекрытие, достигается, если прочность их закрепления в шпуре не менее 5 кН/мм, и прежде всего определяется их прочностью на разрыв, при этом для условий с ожидаемыми смещениями пород от 300 до 1000 мм, прочность анкеров должна быть от 300 до 950 кН

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мельников Н.И. Анкерная крепь. - М.: Недра, 1980. - 252 с.
2. Luo J., Haycocks M., Karmis M., Westman E. A critical overview of U.S. rock bolting practices // Third International Symposium Roofbolting in Mining, Aachen, 1998, pp.13-34.
3. Peng S. Coal mine ground control.- Wiley, 1986. – 452 p.
4. Виноградов В.В. Геомеханика управления состоянием массива вблизи горных выработок – К.: Наук. думка, 1989. – 192 с.
5. Булат А.Ф., Виноградов В.В. Опорно-анкерное крепление горных выработок угольных шахт. – Днепропетровск, 2002. – 372 с.
6. Campoli A. Variables affecting polyester resin anchorage performance with United States roof bolting systems //

4-th International Symposium "Roofbolting in Mining", Aachen, 2001, pp.19-28.

7. Jing L. A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. – 2003. № 40, pp. 283-353.

8. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. The finite element method. – Butterworth-Heinemann, 2000. – 690 p.

9. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. – М. Недра, 1987. – 224 с.

УДК 622.838

А.В. Ведмедев

КОЭФФИЦИЕНТ ФОРМЫ В РАСЧЁТАХ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Розглянуті розподіли нормальних напружень і характер руйнування в ціликах різноманітної форми. Приведені і узагальнені вирази коефіцієнтів форми різних авторів. Проаналізовані деякі параметри камерно-стовпової системи розробки в залежності від різних виразів коефіцієнтів форми.

SHAPE FACTOR FOR UNDERGROUND CONSTRUCTIONS DESIGNS

Normal stresses distributions and failure mode in various form pillars are considered. Shape factor expressions of different authors are given and generalized. Some room-and-pillar system parameters depending on various shape factor expressions are analyzed.

Изучение проявлений горного давления на шахтах, разрабатывающих мощные пласты полезного ископаемого, включает исследование влияния формы на прочностные характеристики опорных целиков для получения или корректировки исходных данных, необходимых при выборе рациональных параметров камерно-столбовой системы разработки.

Вопросами изучения зависимости несущей способности от формы целиков занималось множество исследователей, в работах которых были получены самые разнообразные эмпирические зависимости. Во всех этих выражениях коэффициента формы прослеживается следующая наблюдаемая в лабораторных условиях закономерность: с увеличением высоты образцов прочность уменьшается и, наоборот, с увеличением ширины образцов прочность увеличивается.

Многими исследователями [1, 2] давно установлено, что при испытании хрупких образцов горных пород в классе напряжений $\sigma_1 > 0$, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ в их объеме возникает неравномерное напряженное состояние, анализ и математическое описание которого затруднено из-за целого ряда причин [3].

Авторами работы [4] в результате моделирования методом фотоупругости были получены распределения напряжений в моделях целиков. Когда целик однороден и составляет одно целое с потолочиной, то при нагрузках он деформируется как в продольном, так и поперечном направлениях. Перемещение целика в поперечном направлении сдерживается потолочиной. В результате в целике у контакта с потолочиной образуется клиновидная область всестороннего сжатия, являющаяся наиболее устойчивой частью целика.

Наибольшей абсолютной величины сжимающие напряжения σ_y достигают в точках контакта, расположенных вблизи углов камер на контактах целика с бо-