

кова думка, 2001. – 520 с.

4. Амусин Б.З., Фадеев А.Б. Метод конечных элементов при решении задач горной геомеханики. – М. Недра, 1975. – 144 с.

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

6. Joel H. Ferziger, Milovan Peric. Computational Methods for Fluid Dynamics. – Springer-Verlag Berlin, 2002. – 424 p.

УДК 622.411.332.023.623:622.83

М.н.с. А.П. Круковский
(ИГТМ НАН Украины)

ФОРМИРОВАНИЕ ПОРОДНОЙ ОПОРЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ АНКЕРА ВЫСОКОЙ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ

У статті обґрунтовуються геомеханічні особливості формування опори у покрівлі виробки, яка утворюється анкером високої несучої здатності. Розглянуто вплив встановленого анкера на напружений стан у покрівлі виробки. Виконано аналіз отриманих результатів.

FORMATION OF THE ROCK FOOT WITH APPLICATION OF THE ANCHOR OF THE TALL CARRYING CAPACITY

In the article research formation of abutment overlapping in a roof with anchors of high bearing capacity. Influence of the installed anchor on stress condition of mine roof. The analysis of obtained results is executed.

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-III категорий устойчивости удается удержать на уровне 20-50 мм [1].

Изучим степень и характер влияния, которое оказывает анкер высокой несущей способности на напряженно-деформированное стояние пород в кровле выработки, и оценим размеры области его воздействия. Для этого вначале необходимо рассмотреть состояние пород кровли для двух случаев. Первый – без установленного анкера, и второй – с установленным в кровле одиночным анкером.

Для данного исследования проведем вычислительный эксперимент. Моделирование выполним с применением метода конечных элементов [2].

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. Начальное напряжение в горном массиве $\sigma_0 = 20$ МПа, что соответствует глубине заложения выработки равной $H = 800$ м. Материал массива – изотропная среда с параметрами: $E_m = 2 \cdot 10^5$ МПа, $\nu_m = 0,2$, $\sigma_{сж}^{ост} = 20$ МПа.

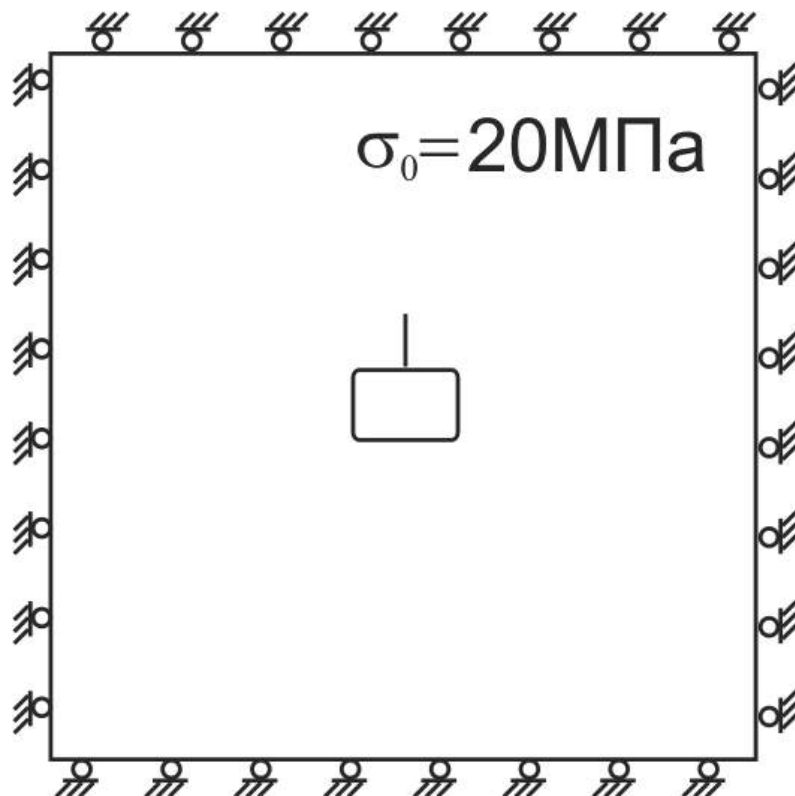


Рис. 1- Расчетная схема задачи.

Расчеты проводились, как отмечалось выше, в двух варианта. Первый – без анкерного крепления, и второй – с установленным в кровле одним анкером.

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 γ – плотность вышележащих слоев пород, H – глубина расположения выработки.

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

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

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

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

Параметр Лоде-Надаи μ_σ характеризует вид напряженного состояния (при $\mu_\sigma = -1$ реализуется обобщенное растяжение, при $\mu_\sigma = 0$ – обобщенный сдвиг, а при $\mu_\sigma = 1$ – обобщенное сжатие) [3].

В нетронутом массиве вне зоны влияния горной выработки, горные породы находятся в условиях трехосного сжатия. Вертикальная компонента поля напряжений определяется весом вышележащей толщи горных пород, а две горизонтальные – боковым распором пород. Поскольку коэффициенты бокового распора близки к единице, то состояние горных пород в естественном залегании близко к равномерному сжатию. Разность между главными компонентами напряжений в нетронутом массиве, как правило, близка к нулю. Именно поэтому независимо от глубины залегания горных пород процесс разрушения их не возникает. Такое состояние горных пород сохраняется и в массиве с горной выработкой, но на некотором удалении от нее.

С проведением горной выработки, в пределах зоны ее влияния поле напряжений в горных породах изменяется. Происходит перераспределение напряжений между главными компонентами. Минимальная компонента стремится к нулю, а максимальная увеличивается и становится больше, чем максимальная компонента главных напряжений в нетронутом массиве.

Рассмотрим напряженное состояние горного массива вокруг одиночной горной выработки. На рис. 2 представлено распределение параметров Q и P вокруг одиночной незакрепленной горной выработки стандартного прямоугольного поперечного сечения высотой $h=3,0$ м и шириной $b=4,5$ м.

В горных породах в непосредственной близости от контура выработки по мере удаления забоя минимальная компонента напряжений становится близкой к нулевому значению. Разрушение приконтурного массива в таких условиях происходит посредством разделения его на отдельные слабо взаимодействующие блоки и требует на свое развитие минимальных затрат энергии. Поэтому для поддержания самопроизвольного развития разрушения горных пород все дальше вглубь приконтурного массива, как правило, достаточно работы упругих деформаций, вызванных перераспределением компонент напряжений трехосносжатых горных пород [4].

Зона самопроизвольного развития разрушения приконтурных пород первоначально, в поперечном сечении в непосредственной близости от забоя выра-

ботки, ограничена изолинией "b" ($P=0,2$; см. рис 2). Эта зона в виде свода высотой до половины ширины выработки полностью включает в себя область 3 пониженных значений параметра Q , пересекает практически по продольным осям овалы области 1 и 2 повышенных значений параметра Q , и частично включает в себя область 4. Развитие разрушения в этой области для незакрепленной выработки начинается в глубине призабойной части массива на некотором расстоянии впереди забоя. Начинается разрушение трещинами, которые развиваются от области 1 параллельно к области 3.

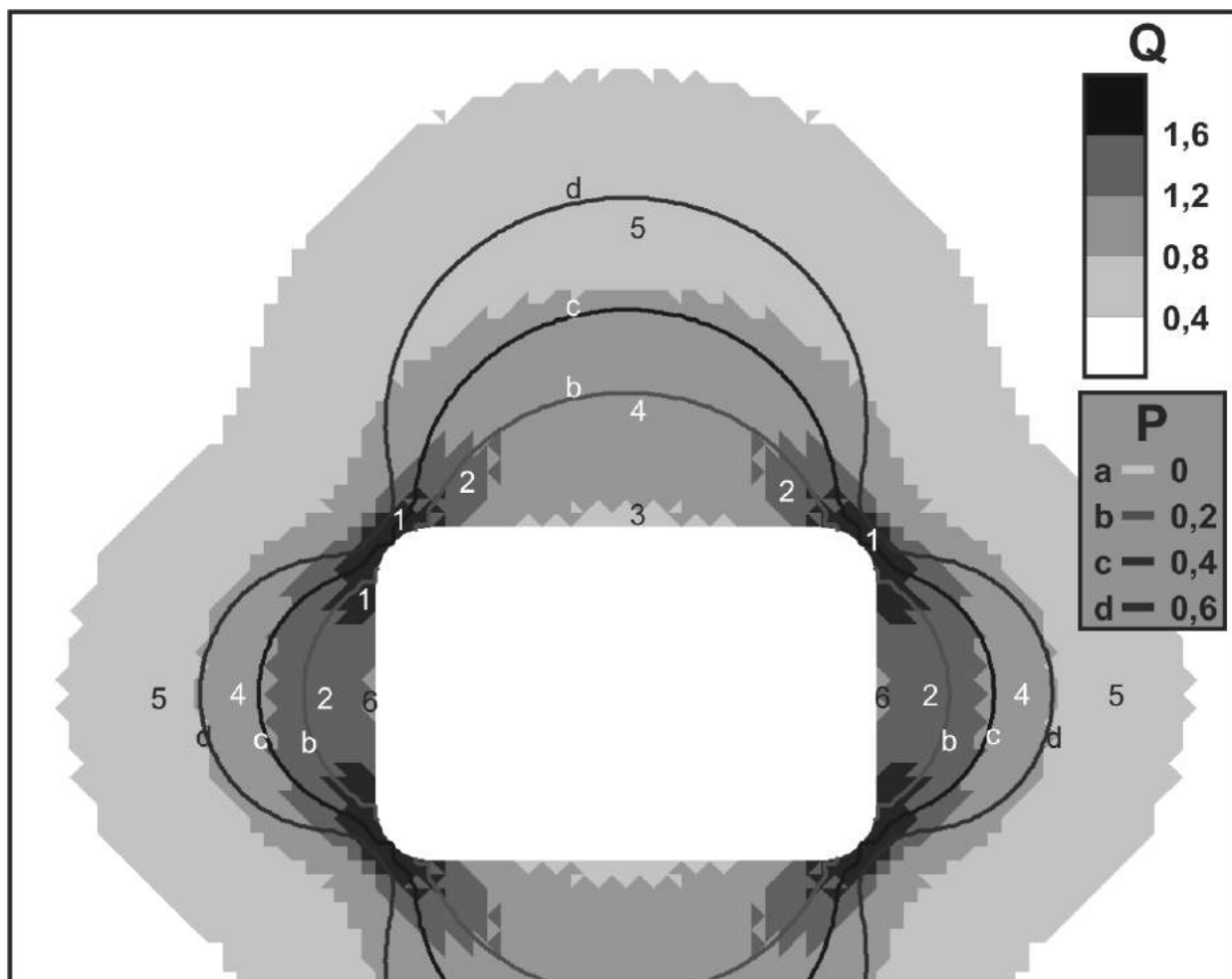


Рис. 2 - Распределение параметра Q (рис. а) и P (рис. б) вокруг незакрепленной горной выработки.

К моменту обнажения забоем разделение массива горных пород в своде разрушения на блоки зачастую завершено. С удалением от контура выработки в зоне, ограниченной изолинией "c" ($P=0,4$; см. рис 2), минимальная компонента напряжений возрастает от $0,2\gamma H$ до $0,4\gamma H$, поэтому все большая часть упругой энергии сжатых горных пород расходуется не на развитие разрушения, а на трение между блоками, отдельностями и берегами трещин. Здесь минимальной компонентой напряжений достигается пороговое значение, происходит блокирование самопроизвольного режима разрушения. Система "зона нарушенных

горных пород – зона ненарушенных горных пород" приходит в равновесное состояние. На этом и завершается развитие геомеханических процессов, вызванных проведением горной выработки, результатом которых является перераспределение напряжений в приконтурных породах и их структурные изменения. Дальнейшее развитие зоны разрушения может происходить только за счет дополнительных внешних воздействий.

В боках выработки прямоугольного поперечного сечения зона самопроизвольного разрушения пород, ограниченная изолинией "b" ($P=0,2$; рис 2), также, как правило, формируется до обнажения ее забоем и первоначально представляет собой линзу сползания, толщина которой порядка половины высоты выработки. Сдвижение разрушенных горных пород этой зоны провоцирует дальнейшее развитие самопроизвольного разрушения вглубь массива.

На рис. 3 приведено распределение параметра Лоде-Надаи вокруг незакрепленной одиночной горной выработки.



Рис. 3 - Распределение параметра Лоде-Надаи вокруг незакрепленной одиночной горной выработки.

Из представленной схемы 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. 2). Поэтому при невысокой прочности горных пород, в прикон-

турной зоне, где не выполняется условие $\sigma_3 \geq 0,1 \div 0,3\sigma_{сж}$ происходит их разупрочнение и разрыхление [4]. Данное значение минимальной компоненты главных напряжений является пороговым. Превышение его блокирует возможность возникновения разрушения.

По мере удаления от контура выработки в глубину массива минимальная компонента главных напряжений возрастает. Условие $\sigma_3 \geq 0,1 \div 0,3\sigma_{сж}$ начинает 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.

Для незакрепленной выработки усилия, прижимающие блоки друг к другу в своде выработки, - незначительны, сцепление между ними низкое, поэтому нарушенные горные породы в своде обрушения с отходом забоя под действием собственного веса приобретают возможность смещений в выработку. В результате таких смещений происходит разрыхление горных пород свода и снижение действующей здесь минимальной компоненты напряжений. Таким образом, нарушается равновесное состояние системы "зона нарушенных горных пород – зона ненарушенных горных пород", возникает возможность развития разрушения вглубь массива, т.е. в ту часть массива, в которой первоначально величины минимальной компоненты напряжений достаточны для блокирования разрушения. Горная выработка в результате именно такого сценария развития процесса разрушения становится неустойчивой.

Для выяснения механизмов работы анкерной крепи нового технического уровня рассмотрим распределение параметров Q и P вокруг одиночной горной выработки прямоугольного поперечного сечения с одним анкером, установленным в центральной части кровли (рис. 4).

При расчетах принято, что в забойной части выработки массив горных пород находится в нетронутом состоянии и все изменения поля напряжений, вызванные проведением выработки, происходят после установки анкера, т.е. анкерная крепь воспринимает полностью всю нагрузку от смещающихся приконтурных пород.

Сопоставляя полученные результаты расчетов с распределением напряжений для незакрепленной выработки (рис. 2), можно отметить следующие существенные изменения.

Стальная штанга, удерживая приконтурные породы от смещения во внутрь выработки, сохраняет в области 7 приконтурный массив в сжатом состоянии со значением параметра Q для этой области меньше 0,4, по мере удаления от анкерной штанги значение параметра Q возрастает.

Зона самопроизвольного развития разрушения приконтурных пород, представлявшая собой для незакрепленной выработки свод обрушения пород кров-

ли выработки высотой порядка половины ее ширины, трансформировалась в две отделенные друг от друга зоны с более «безопасными» параметрами.

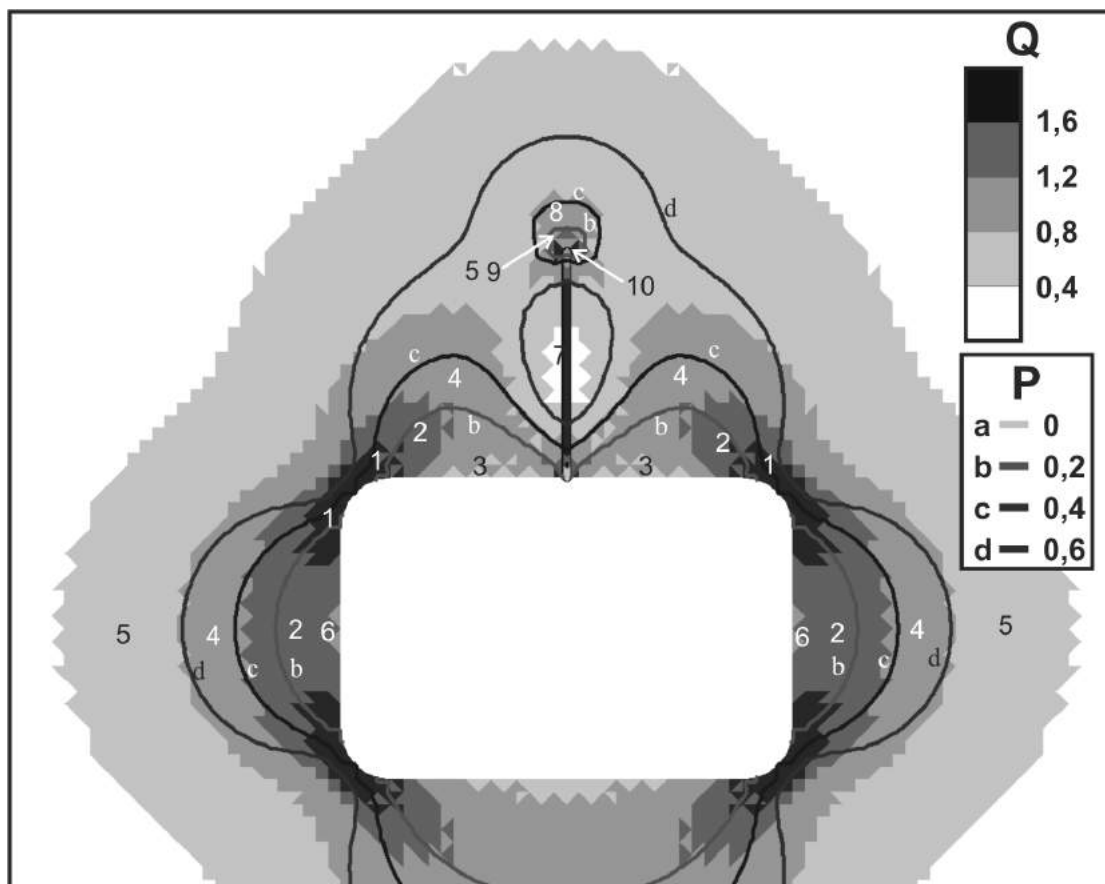


Рис. 4 - Распределение параметров Q и P вокруг одиночной горной выработки с одним анкером, установленным в кровле

Высота каждого из сводов обрушения, ограниченных изолинией "b" (рис. 4) не превышает половины расстояния между анкером и боками выработки, т.е. не превышает четверти ширины выработки. Центральная часть приконтурных пород в кровле выработки оказывается практически полностью вне зоны самопроизвольного разрушения и находится в состоянии трехосного сжатия с повышенными значениями параметра P. Зона трехосносжатых пород с повышенными значениями минимальной компоненты напряжений свыше $0,2\gamma H$ подходит непосредственно к поверхности выработки.

На рис. 5 приведено распределение параметра Лоде-Надаи вокруг выработки, в кровле которой установлен 1 анкер.

Из представленной схемы видно, что распределение данного параметра претерпело изменение по сравнению с незакрепленной выработкой. Вокруг анкера сохранилась область, близкая к обобщенному сжатию, что соответствует состоянию пород в нетронутом массиве. Значение параметра μ_σ в зоне непосредственно возле анкерной штанги равно 1, с последующим уменьшением при удалении от нее. При удалении более чем на 1 метр значение параметра Лоде-

Надаи становится меньше $-0,5$. Таким образом, в области влияния анкера горные породы находятся в состоянии обобщенного сжатия где $\mu_\sigma > 0,5$, или близком к нему при $0 < \mu_\sigma < 0,5$.

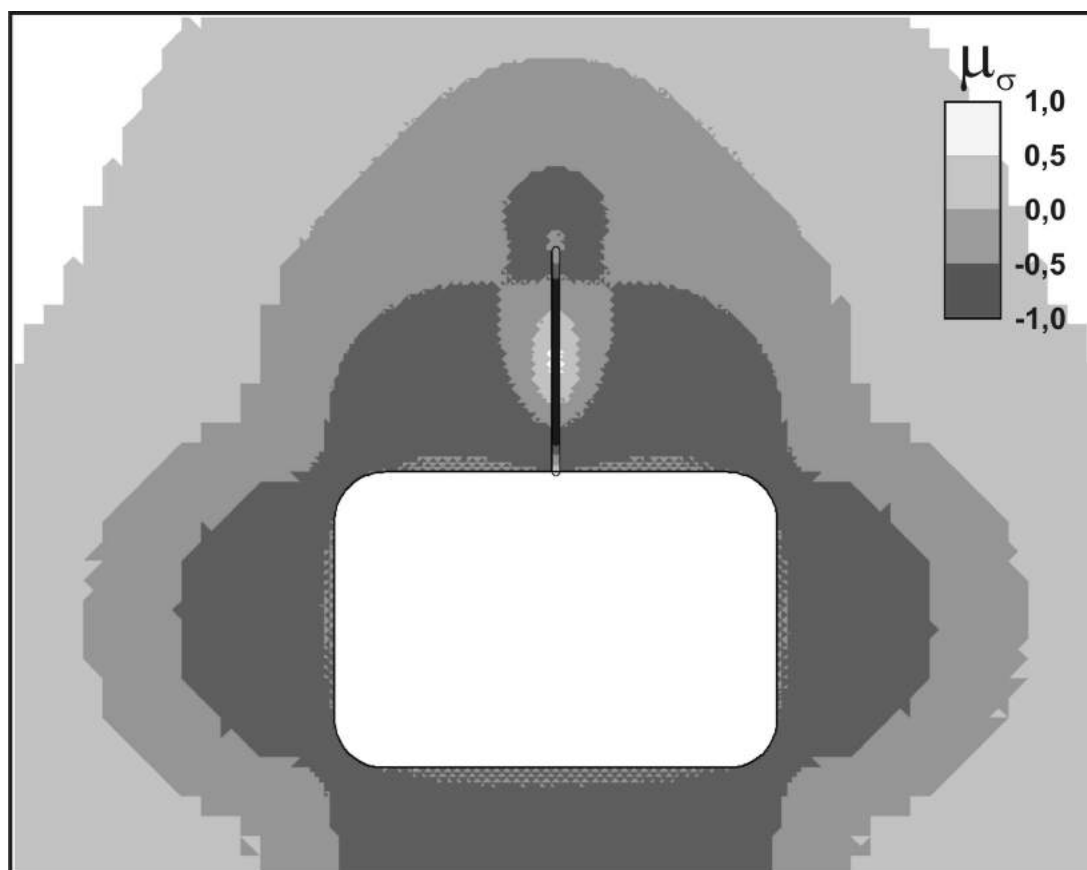


Рис. 5 - Распределение параметра Лоде-Надаи вокруг незакрепленной одиночной горной выработки.

Как отмечалось выше, параметр P , определяющий минимальную компоненту главных напряжений в области воздействия анкера на горные породы кровли, имеет значение, большее $0,2$. Данное значение минимальной компоненты главных напряжений является пороговым. Превышение его блокирует возможность возникновения разрушения. Горные породы в этой области деформируются без разрыхления и находятся в напряженном состоянии, близком к обобщенному сжатию. А в непосредственной близости к анкеру деформирование горных пород кровли происходит в рамках упругих деформаций.

Поскольку горные породы непосредственной кровли выработки оказываются соединенными с более устойчивыми породами основной кровли не только стальной штангой, а и упрочненным породным блоком, можно констатировать, что установка даже одного отдельного анкера может приводить к повышению устойчивости выработки. Область 7 (рис. 4) в связи с ее функциональной ролью можно определить как опору, которая удерживает горные породы приконтурной зоны от смещения в выработку. Формирование опоры снижает возможность развития разрушения горных пород в непосредственной кровле выработки.

Следовательно, вокруг анкерной штанги в приконтурном массиве может быть создан породный блок, в котором максимально сохранено состояние нетронутого массива и достигнута его высокая прочность, благодаря физическому объединению высоких прочностей горной породы на всестороннее сжатие и стальной штанги на растяжение.

Следует также отметить, что, если установка анкера привела к улучшению состояния пород вблизи от контура выработки, то в окрестности заглубленного конца штанги состояние пород в определенной мере ухудшилось в связи с неблагоприятным изменением здесь распределения компонент напряжений. В непосредственной близости от заглубленного конца анкера образовалась область 9 (значения параметра Q свыше 1,6), которую охватывают области 8 ($1,2 \leq Q \leq 1,6$) и 7 ($0,8 \leq Q \leq 1,2$).

Размеры областей 7, 8, 9 и их соотношения между собой определяются нагрузкой на анкер и соотношением модулей упругости вмещающих горных пород, полимерного состава и стали. В окрестности этого конца штанги значения параметра Q и P критичны для возникновения здесь самопроизвольного разрушения горных пород. Здесь образуются зона, ограниченная изолинией "а" ($P \leq 0$), с растягивающими минимальными напряжениями, которая способствует развитию самопроизвольного разрушения без затрат энергии упругих деформаций на трение между берегами трещин, а охватывающая ее зона с низким значением сжимающих напряжений, ограниченная изолинией "b" ($P \leq 0,2$), не может обеспечить необходимого сдерживающего воздействия.

Вместе с тем, в связи с отсутствием свободной поверхности в непосредственной близости от заглубленного конца анкера, разрушение горных пород не имеет здесь возможности распространиться на большую окрестность и не представляет собой опасности для изменения устойчивости выработки. Однако, возникшая здесь зона разрушения может стать при определенных условиях первопричиной для отслоения от остального массива горных пород всего породного слоя, упрочненного анкерами.

В целом, влияние одной анкерной штанги на характер распределения напряжений имеет в приконтурных горных породах как положительное, так и негативное воздействие. В непосредственной близости от обнажения компоненты напряжений и их соотношения изменяются в благоприятную сторону, блокируя самопроизвольное разрушение. В окрестности заглубленного конца анкера компоненты напряжений и их соотношения изменяются в опасную сторону, формируя предпосылки для возникновения самопроизвольного разрушения. Область влияния анкера имеет ограниченные размеры и за ее пределами характер распределения и значения параметров Q и P не изменяются.

Максимумы напряжений в рабочей части анкеров приходятся на участки с наименьшими изменениями ΔQ в породе вокруг горной выработки в сравнении с его значениями в нетронутом массиве, т.е. там, где анкер сохранил породы в состоянии, наиболее близком к состоянию нетронутого массива. Величина максимума напряжений в анкерах без опорной шайбы в основном зависит от плотности их установки. Поэтому плотность установки анкеров должна быть таковой, чтобы

максимальные напряжения не превышали (с учетом коэффициента запаса) на протяжении всего периода эксплуатации выработки предельно допустимых значений (по критериям прочности на разрыв в рабочей части штанги).

Такой характер распределения напряжений в анкерной штанге означает, что она эффективно удерживает горные породы в состоянии трехосного сжатия с малыми значениями параметра Q только в средней части. На остальных участках эффективность работы штанги снижается пропорционально снижению действующих в ней напряжений.

Отмеченные выше особенности изменения картины распределения напряжений вблизи горной выработки проявляются, только если анкер устанавливается в нетронутый или, точнее, в неразгруженный массив. Если анкер устанавливается в массив приконтурных пород, в котором произошла частичная или полная реализация возможных смещений в выработку и сформирована вблизи нее частично или полностью зона нарушенных пород с их разупрочнением и разрыхлением, то роль анкера, как формирователя опоры снижается или теряется полностью. Анкер в этом случае, независимо от его несущей способности, может выполнять только вспомогательные функции удержания нарушенных пород от обрушения в горную выработку. Так происходит при установке анкера на значительном удалении от забоя выработки и в местах перехода от податливой крепи к анкерной. Функция формирователя опоры у анкера также теряется частично или полностью при применении закрепителя с низкой или недостаточной жесткостью, при закреплении штанги не по всей ее длине.

Таким образом, с введением понятия породной опоры, можно описать блок горных пород, возможность смещения в выработку которых ограничена анкером. Напряженное состояние в такой породной опоре характеризуется значением параметра Лоде-Надаи не менее 0,5 или степенью близости к состоянию нетронутого массива с повышенными значениями минимальной компоненты напряжений от 0,3 до 0,6 γH .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булат А.Ф., Виноградов В.В. Опорно-анкерное крепление горных выработок угольных шахт. – Днепропетровск, 2002. – 372 с.
2. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. The finite element method. – Butterworth-Heinemann, 2000. – 690 p.
3. Норель Б.К. Изменение механической прочности угольного пласта в угольном массиве. – М. Наука, 1982. – 128с.
4. Виноградов В.В. Геомеханика управления состоянием массива вблизи горных выработок – К.: Наук. думка, 1989. – 192 с.