

Висновки. Особливості гірничо-геологічних умов територій великих міст України такі, що застосування розроблених конструкцій і технологій підземного будівництва не може бути здійснено без урахування їх специфіки. Враховуючи цей факт, по-перше, великий обсяг існуючих гірничих виробок, придатних для вторинного використання, і можливість збільшення цього обсягу із зростанням масштабів підземної розробки родовищ кам'яних будівельних матеріалів створюють відповідні гірничотехнічні передумови для підземного розміщення різних підприємств, а також для успішного вирішення цієї проблеми необхідно на основі досліджень та накопиченого досвіду узагальнювати результати і наповнювати інженерними заходами відновлення конкретних видів геотехнічних систем, характерних для території України.

Список літератури

1. Пустовойтенко В.П. Освоение подземного пространства – важнейшая задача развития крупных городов Украины // Тезисы докладов междунар. конф. «Проблемы и перспективы освоения подземного пространства крупных городов». – Днепропетровск, 1996. – С. 3-13.
2. Кельме Н.Я., Вайда З. Города под землей. Стройиздат, 1985. – 248 с.
3. Умнов В.А., Харченко А.В. Проблемы развития городской подземной транспортной инфраструктуры. – М.: МГГУ, 2004. – 126 с.
4. Папернов М.М., Зильберборг А.Ф. Производственные и складские объекты в горных выработках. М.: Стройиздат, 1980. – 123 с.
5. Пустовойтенко В.П. Геотехнічне забезпечення підземного будівництва в Україні.-Київ, 1999. – 257 с.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Шашенком О.М.
Надійшла до редакції 01.04.10*

УДК 622.831

© С.Б. Тулуб, А.В. Солодянкін

ОБОСНОВАНИЕ КОНЦЕПЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ В ВЫРАБОТКАХ УГОЛЬНЫХ ШАХТ В УСЛОВИЯХ ОЖИДАЕМЫХ БОЛЬШИХ СМЕЩЕНИЙ КОНТУРА

Предложена новая концепция управления геомеханическими процессами в горных выработках в условиях ожидаемых больших деформаций приконтурного массива. В основу концепции положены критерии оценки устойчивого состояния выработки – критический радиус зоны неупругих деформаций и критические смещения контура, а также установленные закономерности деформирования массива, учитывающие время относительной стабилизации геомеханических процессов.

Запропонована нова концепція управління геомеханічними процесами в гірничих виробках в умовах очікуваних великих деформацій приконтурного масиву. В основу концепції покладені критерії оцінки стійкого стану виробки – критичний радіус зони непружних деформацій і критичні зміщення контура, а також встановлені закономірності деформації масиву, що враховують час відносної стабілізації геомеханічних процесів.

New conception of management geomechanic processes is offered in the workings in the conditions of the expected large rock mass deformations. In basis of conception the criteria of estimation of the stable state of workings are fixed is a critical radius of area of unresilient deformations and critical displacements of contour, and also the set conformities to the law deformations of rock mass, taking into account time of the relative stabilizing of geomechanic processes.

Введение. Добыча полезных ископаемых неизбежно связана с увеличением глубины горных работ. При этом существенно возрастает гравитационная составляющая горного давления, меняются физико-механические свойства породной среды и ее поведение, снижается степень геологической разведанности месторождений. Создание искусственных полостей в земной коре вызывает перераспределение начального поля напряжений, приводит к разрушению массива пород, его сдвиганиям, изменению пространственной структуры массива. Все чаще эти процессы носят катастрофический характер, сопровождаются человеческими и материальными потерями. В связи с этим, одной из наиболее актуальных проблем является обеспечение безопасности и эффективности подземных работ в контролируемых геомеханических условиях.

Постановка задачи. Наиболее тяжелые последствия проявлений повышенного горного давления в выработках глубоких шахт связаны с так называемыми большими деформациями окружающего выработку породного массива. При этом в качестве «больших деформаций» рассматриваются такие, которые, приводят к потере выработкой эксплуатационных функций и необходимости выполнения ремонтно-восстановительных работ (перекрепление, подрывка почвы и т.п).

Большие деформации породного массива в определенных горно-геологических условиях могут реализовываться чрезвычайно быстро – горные удары, внезапные выбросы угля, породы и газа. Другие протекают относительно медленно – деформирование и разрушения крепи, формирование вывалов, пучение пород почвы. Являясь, по сути, процессами статическими, их последствия не менее тяжелы. Так, с глубиной величина поднятия пород почвы за достаточно короткий промежуток времени может достигать величины 1 м и более, принимая характер катастрофического в организационном и экономическом отношении явления.

Решению проблемы обеспечения устойчивости выработок посвящены работы многих ученых и целых коллективов ведущих вузов и научно-исследовательских институтов. В Украине наибольший вклад в ее решение внесли работы Бабиюка Г.В., Бондаренко В.И., Виноградова В.В., Глушко В.Т., Дружко Е.Б., Друцко В.П., Заславского Ю.З., Зорина А.Н., Зборщика М.П., Касьяна Н.Н., Коскова И.Г., Кошелева К.В., Литвинского Г.Г., Максимова А.П., Назимко В.В., Новиковой Л.В., Парчевского Л.Я., Петренко В.Д., Пиньковского Г.С., Роенко А.Н., Сдвижковой Е.А., Усаченко Б.М., Халимендика Ю.М., Шашенко А.Н. и многих других. Однако, несмотря на значительные достижения, учитывая масштабы, специфику объекта исследований и постоянно меняющиеся условия, актуальность этой проблемы не снижается.

В качестве наиболее характерного проявления больших деформаций приконтурного массива на глубоких горизонтах шахт может быть рассмотрено пучение пород почвы. Само понятие «глубокие горизонты» не подразумевает какой-либо конкретной глубины. Комплексным показателем, характеризующим степень сложности условий разработки месторождений полезных ископаемых и определяющий для конкретного региона уровень «больших глубин», является

безразмерное отношение $\theta = R_c/\gamma H$, где R_c – прочность породного массива на одноосное сжатие, γ – объемный вес пород, H – глубина разработки. Оценка условий разработки по показателю θ убедительно объясняет, почему выработки шахт Западного Донбасса, расположенные на глубине 400-500 м находятся в более тяжелых условиях, чем выработки шахт Центрального Донбасса на значительно большей глубине.

Целью настоящей статьи является обоснование концепции управления геомеханическими процессами в выработках угольных шахт в условиях формирования значительных зон деформированных пород и ожидаемых больших смещений контура.

Обоснование рационального подхода к управлению геомеханическими процессами в горных выработках. Основным способом обеспечения устойчивости подземных объектов является установка несущей конструкции (крепей) соответствующей прочности и податливости, обеспечивающей равновесие геомеханической системы «крепь-окружающий массив».

Механизм управления состоянием массива в окрестности горных выработок в условиях возможной потери устойчивости, должен быть связан с механизмом деформирования приконтурной зоны пород и основан на предупреждении разрушения контура выработки, если этого можно достичь применением конструкций (крепей) с высокой несущей способностью, или же снижении их разрыхления и смещений с помощью крепей с высокой несущей способностью при ограниченной податливости.

Выбор такой несущей конструкции может быть осуществлен на основе разных подходов. На рис. 1 показана зависимость величины давления на крепь выработки от величины деформаций (смещений) ее контура после обнажения [1]. Более того, породы подвергаются упругим деформациям (а в тяжелых геомеханических условиях – разрушаются) еще перед забоем. Для того чтобы полностью исключить подобные деформации ($U = 0$), необходимо, чтобы сопротивление крепи P полностью соответствовало величине горного давления. Это означает, например, что в выработке на глубине $H = 1000$ м необходимо установить крепь несущей способностью 25...26 МН/м², что технически и технологически невозможно. После определенной упругой деформации потребуется значительно меньшее сопротивление крепи P , обеспечивающее равновесие системы «крепь-массив». После деформации пород, соответствующей лишь 3 мм, величина сопротивления крепи, необходимая для поддержания равновесия будет равна уже 55 % величины горного давления, а при деформации, соответствующей 60 мм – только 20 % ($P = 5$ МН/м²). Если же величина деформаций превысит определенный соответствующий горно-геологическим условиям уровень (например, 100 мм, (см. рис. 1)), то рабочее сопротивление крепи, необходимое для обеспечения равновесия, вновь значительно возрастет из-за расслоения приконтурных пород.

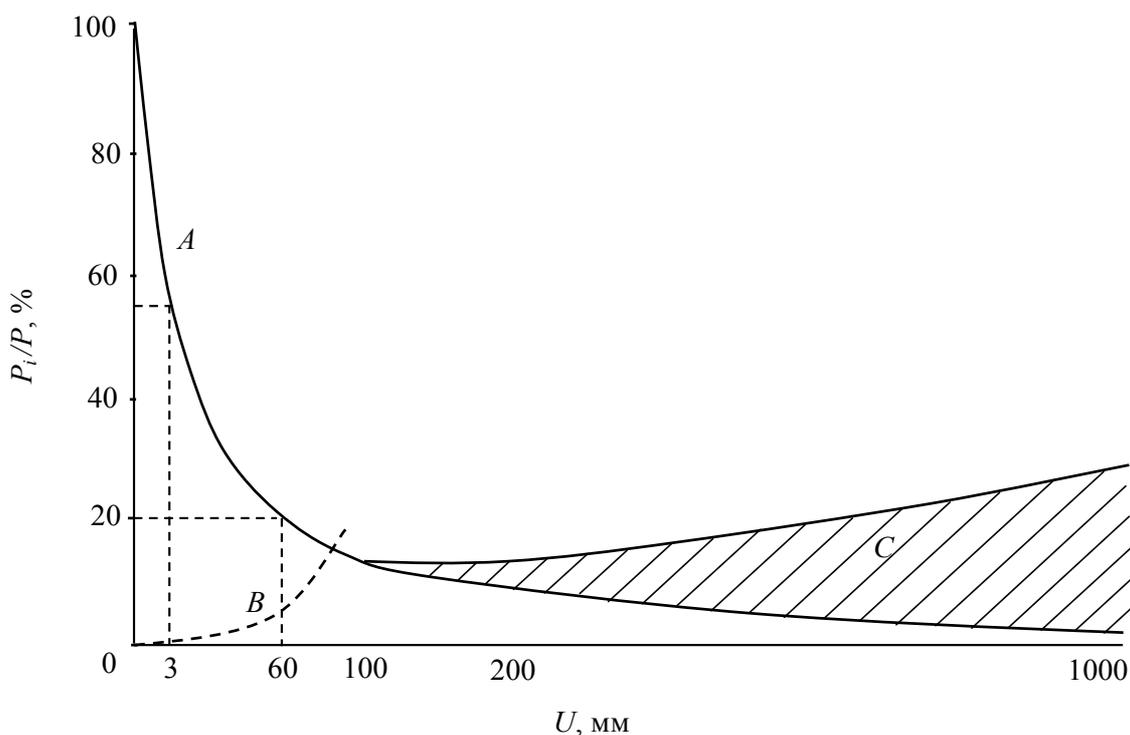


Рис. 1. Зависимость величины давления на крепь выработки от величины деформаций (смещений) ее контура: *A* – характеристика породного массива; *B* – характеристика крепи; *C* – разрыхление приконтурного массива

Один из подходов в обеспечении равновесного состояния системы «крепь-окружающий массив» предполагает максимально быстрый ввод крепи в работу по предупреждению деформаций пород – до реализации части упругих и предупреждения пластических деформаций. Такой подход требует применения жестких крепей. Для пород высокой крепости и нетрещиноватых в качестве таковых применяют набрызгбетонные, анкерные (в качестве основной крепи или в комбинации с набрызгбетоном и металлической сеткой). Для пород менее прочных, для реализации этого подхода требуются весьма мощные, жесткие крепи, препятствующие смещениям массива (до величины нескольких миллиметров).

Недостаток такого подхода в том, что область обеспечения устойчивого (равновесного) состояния вмещающего выработку массива определяется очень малым диапазоном допустимых значений деформаций при высоком уровне потенциальной энергии геомеханической системы «породный массив-крепь-выработка». Такое состояние определяется как неустойчивое равновесие [2]. Незначительные изменения параметров влияющих факторов могут привести к недопустимым значениям деформаций и вызвать потерю устойчивого состояния в виде тяжелых или катастрофических проявлений горного давления.

Поэтому такой подход приемлем для подземных сооружений, расположенных на небольшой глубине, в устойчивых породах (тоннели различного назначения, выработки объектов, не связанных с добычей полезных ископаемых, хранилища и т.п.).

Комплекс протяженных выработок горнодобывающих предприятий часто располагается в породах неустойчивых, трещиноватых, в зонах геологических

нарушений, подверженных влиянию очистных работ. Основной тенденцией развития горнодобывающей промышленности является постоянный рост глубины. Увеличение с глубиной напряженного состояния породного массива в окрестности выработок приводит к росту потенциальной энергии, что и является основной причиной появления больших деформаций породного контура и повышения интенсивности протекания геомеханических процессов, нередко – в виде катастрофических проявлений.

Все это свидетельствует о том, что данные выработки работают в условиях напряжений, близких к предельным. В связи с этим, для рассматриваемых выработок более рациональным является другой подход в обеспечении их устойчивости – снижение уровня потенциальной энергии окружающего массива за счет реализации деформационных процессов при контролируемом управлении со стороны средств крепления и охраны.

Недостаток этого подхода – формирование вокруг выработки зоны разрушенных пород, т.е. наличие больших деформаций приконтурного массива. Однако положительным фактором является то, что в этом случае диапазон допустимых значений смещений пород (деформаций массива) достаточно большой, при существенно меньших значениях НДС.

Такое состояние системы является более устойчивым и в условиях высокой неопределенности влияющих геологических и техногенных факторов более приемлем для обеспечения безопасности горных работ.

Обоснование концепции управления геомеханическими процессами в протяженных выработках глубоких шахт. Концепция управления геомеханическими процессами вокруг протяженных выработок в условиях больших смещений контура и формирования значительных зон неупругих деформаций предполагает, в первую очередь, предупреждение катастрофических проявлений (вывалы пород кровли, пучение почвы) и тяжелых последствий (снижение устойчивости выработки, большие затраты на ремонтные работы и перекрепление) во время строительства и длительной эксплуатации выработок.

Проблема обеспечения устойчивости выработок в этих условиях состоит в том, что вокруг выработки в короткий срок формируется значительная зона разрушенных пород, происходят большие смещения контура. Рассматривая условия больших глубин и сложных горно-геологических условий, которые приводят к образованию вокруг выработки зоны неупругих деформаций значительных размеров, в [3] для описания этого процесса предложена бифуркационная модель пучения, как явление потери упругопластической устойчивости породного массива. В соответствии с ней вокруг выработок, расположенных на большой глубине, при достижении размеров зоны неупругих деформаций (ЗНД) критической величины (или критических смещений контура выработки) система «выработка-крепь-окружающий массив» теряет устойчивость. Чаще всего потеря устойчивости происходит в виде вспучивания пород почвы – как наименее прочного участка выработки.

Идея концепции управления геомеханическими процессами состоит в учете закономерностей протекания геомеханических процессов и применении на каждом этапе строительства и эксплуатации выработки соответствующих спо-

способов обеспечения устойчивости, допускающих формирование демпферной зоны для разгрузки приконтурного массива пород от повышенных напряжений и предотвращающих развитие зоны разрушенных пород и смещения породного контура, приводящих к потере устойчивости массива.

Поведение массива вокруг выработки может быть описано следующей деформационной моделью. После проведения выработки под влиянием повышенных напряжений происходит разрушение приконтурного массива. При этом образуется область неупругих деформаций таких размеров, которые обеспечивают статическое равновесие системы «массив-выработка-крепь». Идеальным случаем является стабилизация геомеханических процессов при достигнутых размерах ЗНД – r_{Lc} и смещениях контура выработки - u_c (рис. 2). Окончание этого этапа является оптимальным с точки зрения управления состоянием геомеханической системы «массив-выработка-крепь». Теоретически это можно осуществить, применяя крепь с регулируемой несущей способностью и податливостью, работающей на протяжении первого этапа в податливом режиме и переходящей в жесткий режим к моменту стабилизации геомеханических процессов.

Естественной стабилизации деформационных процессов, как правило, не происходит, поскольку приконтурный разрушенный массив обладает «высокой чувствительностью» к различным внешним факторам. Дальнейшие деформации можно объяснить некоторым снижением прочности пород, прилегающих к контуру выработки, в результате разрушения внешними агентами (влажность, колебания температур, воздействие агрессивных вод и т.д.), разбуханием глинистых частиц. Кроме того, прочность пород несколько снижается при воздействии на нее длительных нагрузок. Существенное влияние на эти процессы оказывают также очистные работы.

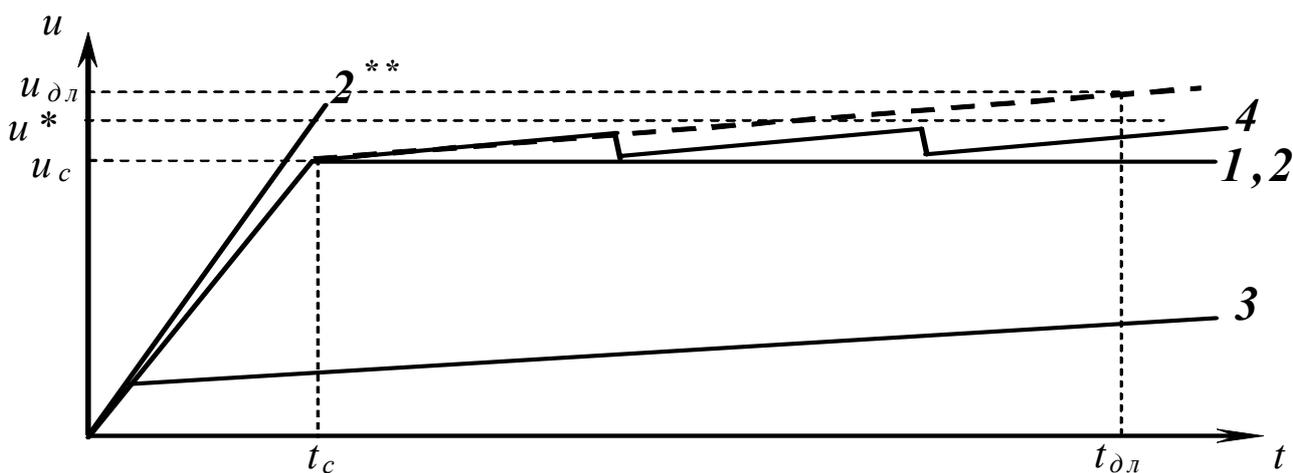


Рис. 2. Возможные схемы протекания геомеханических процессов вокруг выработки – к обоснованию способов повышения устойчивости выработок в условиях ожидаемых больших смещений контура

С ростом внешней нагрузки размеры ЗНД увеличиваются, сохраняя какое-то время равновесие системы. Но при достижении некоторых критических ее размеров происходит относительно быстрый переход системы в неустойчивое состояние – потеря упруго-пластической устойчивости, характеризующееся наличием аномально больших перемещений на контуре выработки – вспучивание пород почвы. Последнего может не произойти, если нагрузка со стороны кровли превысит несущую способность крепи и приведет к вывалу пород.

В результате решения аналитической задачи о потере упругопластической устойчивости породного массива в окрестности одиночной выработки расположенной в однородном массиве, получены критерии, оценивающие возможность потери устойчивости системы «выработка-породный массив» [3, 4]:

$$\bar{\varepsilon}_v r_L^{*2} \ln^2 r_L^* - 2 = 0, \quad (1)$$

где $\bar{\varepsilon}_v$ - среднее значение относительного увеличения объема в пределах зоны неупругих деформаций; r_L^* - относительный критический радиус области пластических деформаций. В случае если выражение (1) меньше нуля, то в окрестности выработки произойдет переход от одного равновесного состояния в другое, сопровождающееся вспучиванием пород почвы.

Функция связи между величинами, входящими в условие (1), в явном виде аппроксимируется относительно r_L^* степенным выражением:

$$r_L^* = 1 + \bar{\varepsilon}_v^{-0.4}. \quad (2)$$

Критический радиус ЗНД функционально связан со смещениями контура выработки, поскольку последние являются следствием объемного расширения пород $\bar{\varepsilon}_v$ в зоне неупругих деформаций, ограниченной радиусом r_L^* .

Зависимость (2), соответствующая критической величине смещений контура выработки определяется зависимостью:

$$u^* = \frac{\varepsilon_v \left[\exp\left(-\frac{(1+\lambda)}{2N_{\theta}B}\right) \left(1 - \frac{(\lambda-1)}{N_{\theta}B}\right) - 1 \right]}{\left(\frac{3,48}{r_L}\right)^{3,33}}, \quad (3)$$

где $N_{\theta} = \theta \sqrt{\psi + \frac{2(1-\psi)}{\theta}}$, $\psi = R_p / R_c$ – коэффициент хрупкости пород, R_p, R_c – соответственно пределы прочности образцов горных пород на одноосное растяжение и сжатие ($0 \leq \psi \leq 1$); $B = \frac{r_L^2 - k_{осм}}{1 - r_L^2}$, r_L^* – безразмерный критический радиус ЗНД, определяемый по формуле (2); λ – коэффициент бокового распора,

$k_{ост} = R_{ост} / R_c$ – коэффициент остаточной прочности; $R_{ост}$ – остаточная прочность пород на одноосное сжатие на контуре выработки.

Установленные критерии вспучивания: r_L^* – относительный критический радиус области пластических деформаций и u^* – критические смещения контура выработки дают однозначный ответ на вопрос возможно ли пучение пород в данных горно-геологических условиях, и при каких значениях ЗНД и смещений контура начинается неуправляемый процесс развития деформаций в почве.

Установленная в [5] зависимость позволяет определить смещения контура выработки в любое время после проведения выработки в зависимости от основных геотехнических факторов:

$$u = 13,5k_n d (a \ln(T) - b) \theta^{(0,9-c)}. \quad (4)$$

где T – время эксплуатации участка выработки, с момента его проведения, сут.; a и b – коэффициенты, зависящие от параметра θ ; c и d – переменные, зависящие от коэффициента λ ; k_n – коэффициент, учитывающий направление выработки по отношению к простиранию пород и угол наклона пластов.

Выбор способов обеспечения устойчивости выработки производится с учетом закономерностей протекания геомеханических процессов, горно-геологических и горнотехнических факторов и типа выработки. При этом возможны следующие направления при обеспечении устойчивости выработок.

1. Критический радиус области пластических деформаций r_L^* и критические смещения контура выработки u^* больше соответствующих показателей в точке, характеризующей стабилизацию геомеханических процессов после проведения выработки r_{Lc} и u_c . Это означает, что на первом этапе вокруг выработки сформировалась ЗНД таких размеров, которые обеспечивают относительное равновесие системы «массив-выработка-крепь».

Сохранить устойчивость (равновесие) системы «массив-выработка-крепь» можно путем создания в приконтурной части условий, препятствующих дальнейшей потере прочности приконтурных пород, повысив их несущую способность путем упрочнения химическими (вяжущими веществами) или механическими (анкерами) способами, а также увеличив отпор крепи и, желательно, изолировав приконтурный массив от воздействия рудничной атмосферы и увлажнения. Величина r_{Li} и u_i после проведения этих мероприятий не достигает критических значений r_L^* и u^* (рис. 2, поз. 1).

2. Критический радиус области пластических деформаций r_L^* и критические смещения контура выработки u^* меньше соответствующих показателей в точке, характеризующей стабилизацию геомеханических процессов после проведения выработки. Это означает, что в данных геомеханических условиях после проведения выработки размеры ЗНД достигают критических значений до стабилизации геомеханических процессов (рис. 2, поз. 2**).

Сохранить устойчивость выработки в этом случае можно с помощью мероприятий по упрочнению приконтурного массива пород до начала формирования ЗНД. Например, применяя податливые анкера, установленные сразу по

сле обнажения массива в призабойной части выработки. Это позволит повысить прочность массива в приконтурной части за счет их армирования, ограничит смещения контура выработки и стабилизирует деформационные процессы до достижения критических величин (рис. 2, поз. 2). После образования демпферной зоны и стабилизации деформационных процессов, проводят мероприятия, препятствующие дальнейшей потере прочности приконтурных пород.

3. При значительных сроках службы и сложных геомеханических условиях актуальным является вопрос безремонтной эксплуатации капитальных горных выработок.

Нагрузки на жесткие крепи, ввиду их малой податливости, зачастую превышают их несущую способность и они, в большинстве случаев, не обеспечивают необходимый эксплуатационный режим работы капитальной выработки на весь срок службы. Применение крепей, обладающих большой податливостью, в подобных условиях приводит к образованию больших зон разрушенных пород, что существенно ухудшает состояние выработок. Однако податливая крепь способствует разгрузке породного массива и позволяет регулировать действующие нагрузки.

В связи с этим для обеспечения устойчивости капитальных выработок в условиях больших деформаций окружающих выработку пород наиболее целесообразным является применение ограничено-податливых крепей с достаточно высокой несущей способностью.

В качестве одного из решений может быть использование двухслойной монолитной податливой крепи, которая объединяет положительные качества обычной бетонной крепи с требуемой в таких условиях податливостью конструкции. В качестве внешнего податливого слоя может использоваться пористый, легко деформирующийся пеноматериал, выполняющий функции податливого (демпферного) элемента конструкции. Внутренний слой из обычного бетона является несущим. Величина смещений контура выработки может быть существенно уменьшена за счет увеличения несущей способности податливого слоя (рис. 2, поз. 3).

4. Для обеспечения устойчивости выработок главных направлений в сложных геомеханических условиях, часто возникает необходимость проведения многократных ремонтов (рис. 2, поз. 4).

Как было сказано выше, даже после относительной стабилизации процессов деформирования и разрушения пород приконтурной части массива, смещения пород продолжают еще длительное время и вызваны они совокупным влиянием большого количества факторов, каждый из которых может иметь разный вклад, как для различных выработок, так и на разных этапах эксплуатации одной выработки. Закономерности влияния всех этих факторов и определение оптимальных затрат на поддержание должно производиться на основе вероятностной модели устойчивости протяженной выработки и с учетом фактора времени.

Во всех случаях обязательными условиями выполнения всех технологических мероприятий должны быть следующие.

- окружающий выработку массив сразу же после обнажения необходимо включать в работу системы «массив-выработка-крепь»;

- при установке несущей конструкции должен быть обеспечен равномерный плотный контакт крепи и породного контура;

- повышенный отпор окружающим породам необходимо обеспечивать за счет использования технических средств, имеющих малую материалоемкость и высокие силовые характеристики (крепь усиления, анкеры, несущая податливая забутовка, рукава «Буллфлекс» и др.);

- способы обеспечения устойчивости выработки должны в максимальной степени использовать несущую способность приконтурного массива путем повышения эффективности отпора самой крепи и использования средств усиления (анкеры, химическое упрочнение пород, крепи усиления);

- конструкция крепи или применение средств усиления должно учитывать негативное влияние несимметричной нагрузки.

Выводы. Для обеспечения устойчивости выработок глубоких шахт, работающих в условиях напряжений, близких к предельным, рациональным является следующий подход – снижение уровня потенциальной энергии окружающего массива за счет реализации деформационных процессов при контролируемом управлении со стороны средств крепления и охраны.

После проведения выработки должен быть обеспечен мониторинг состояния системы «крепь-окружающий массив» на основе критериев устойчивости и закономерностей поведения массива пород.

Выбор способов обеспечения устойчивости выработки производится с учетом закономерностей протекания геомеханических процессов, горно-геологических и горнотехнических факторов и типа выработки.

Для эффективности принятых средств и способов обеспечения длительной устойчивости выработок обязательным является выполнение ряда мероприятий, направленных, главным образом, на формирование системы «массив-выработка-крепь» и использование несущей способности приконтурных пород.

Список литературы

1. Араунер Х.-В. Управление горным давлением при использовании технологии заполнения закрепного пространства и набрызгбетонирования // Глюкауф. – 1985. - № 2. – С. 5-9.
2. Вальмир А.С. Устойчивость деформируемых систем. М.: Наука, 1967. – 524 с.
3. Шашенко А.Н., Тулуб С.Б., Сдвижкова Е.А. Некоторые задачи статистической геомеханики. – К.: Універ. вид-во “Пульсари”, 2002. – 304 с.
4. Шашенко А.Н., Солодянкин А.В. Критерии оценки устойчивости пород почвы горных выработок // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2007. - № 1. – С. 44-49.
5. Солодянкин О.В. Дослідження зміщень контуру гірничих виробок в шахтних умовах // Матеріали міжнародної конференції “Форум гірників-2008”. Том 2. – Дніпропетровськ: РВК НГУ. – 2008. – С. 199-201.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Сдвіжковою О.А.
Надійшла до редакції 22.03.10*