

изменения напряженного состояния смоделировано положение массива после отработки гидромеханизированным участком трех верхних слоев (рис. 6). Согласно полученному прогнозу, не происходит увеличения порового давления в массиве (рис. 6, а), наибольшая концентрация его отмечается в приоткосной зоне в районе нижних бровок уступов. Зона максимальных эффективных напряжений (рис. 6, б), характеризуемая наибольшей прочностью грунтов, формируется на расстоянии около 60-110 м от откоса, а также в основании забоя.

При приближению к откосу борта породы характеризуются снижением устойчивости и повышением уровня эффективных напряжений, что ведет к их деформациям и обрушениям. При анализе деформаций массива наиболее показательны результаты моделирования горизонтальных смещений (рис. 6, в). Наибольшие величины смещений характерны для поверхности откоса. По мере удаления от откоса горизонтальные смещения постепенно снижаются и на расстоянии около 240 м прекращаются. При этом по верхним уступам общий вектор де-

формаций характеризуется большими значениями, чем по нижним (рис. 6, г).

Анализ численной геомеханической модели показывает, что при отработке массива тремя уступами на высоту до 40 м прогнозируются деформации в виде сплыва с захватом пород, прилегающих к откосу, на расстояние до 240 м. Таким образом, результаты проведенных исследований позволяют обосновать безопасные параметры технологии вскрышных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Указания по методам геомеханического обоснования оптимальных параметров гидроотвалов и отвалов на слабых основаниях. Ч. I. и Ч. II / М-во угольной пром-ти СССР. Всесоюзн. ордена Трудового Красного Знамени науч.-исслед. ин-т горн. геомех. и маркшейд. дела. – Л.: 1989, 1990.
2. Костюков, Е. В. Экспериментально-аналитическое исследование геомеханического состояния техногенного массива гидроотвала / Е. А. Костюков, С. М. Простов, С. П. Бахаева // Вестн. КузГТУ. 2006. №6.2. С. 4-28.

□ Авторы статьи:

Костюков
Евгений Владимирович
– канд. техн. наук, науч. сотр. Кемеровского Представительства
ВНИМИ

Простов
Сергей Михайлович
– докт. техн. наук, проф. каф. теоретической и геотехнической механики

Бахаева
Светлана Петровна
– канд. техн. наук, доц. каф. маркшейдерского дела и геодезии, зам. дир. НФ "КУЗБАСС-НИИОГР"

УДК 622.281

А.Е. Майоров

КОНСОЛИДАЦИЯ ПРИКОНТУРНОГО МАССИВА ПОРОД ПРИ КРЕПЛЕНИИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

Основная задача крепления горных выработок – надежность, сохранение стабильной устойчивости контура во времени. Разнообразие и сложность горно-геологических и горно-технических условий, увеличение глубины разработки месторождений требует применения крепей с высокой несущей способностью, при этом решение задачи связано с увеличением их материалоемкости, что всегда являлось и является дорогостоящим. Развитие технологий комбинированного крепления на базе инъекционного упрочнения приконтурного массива горных пород в сочетании с анкерной крепью позволит повысить экономическую эффективность и надежность.

Дальнейшее повествование построено в соответствии с [1-3], где рассмотрены качественные изменения в пространственном напряженно-деформированном состоянии массива горных по-

род при проходке горной выработки, развита теория структурно-дилатационной прочности и сдвигового деформирования горных пород, а также [4, 5], где представлена новая методология описания деформируемого твердого тела как многоуровневой самосогласующейся системы, в модели которой учитывается вся иерархия масштабов структурных (мезомасштабных) уровней деформации.

В попытке более полного понимания механических процессов, происходящих при формировании приконтурной зоны проводимой горной выработки, массив горных пород рассматривается как нагружаемая многоуровневая модель деформируемого структурно-неоднородного твердого тела.

Массив горных пород, исходно представляющий собой сложную многовариантную по составу

и напряженно-деформированному состоянию структуру, уже в первородном состоянии на макромасштабном уровне содержит блочно-слоевое строение со сформировавшейся естественной трещиноватостью, поверхностями ослаблений и обладающий определенной глобальной устойчивостью. Данной структуре можно условно присвоить 0 макромасштабный уровень деформации.

В процессе сооружения выработки в массиве горных пород происходят два основных процесса: первое - радиальное напряжение обязательно падает по величине, даже если со стороны выработки организован подпор, как правило, по величине меньший, чем было исходное напряжение до проходки; второе - происходит развитие касательных напряжений за счет различия в главных напряжениях исходного состояния или возникших при создании выработки. При достижении пика касательных напряжений дальнейшее сопротивление сдвигу с ростом деформаций падает, что обычно и называют разупрочнением горных пород. В результате, изучение напряженно-деформированного состояния в окрестности выработки можно свести к исследованию сдвиговой прочности горного массива как определенного свойства, принципиально отличающего твердые тела от жидких и газообразных.

В приконтурной зоне горной выработки, где максимальные касательные напряжения по главным площадкам сдвига превышают сдвиговую прочность горных пород, развиваются не только общие деформации, но и деформации сдвига, а значит и дилатансия. Таким образом, первичное нарушение исходной сплошности горных пород происходит при сдвиге в направлении действия максимальных касательных напряжений в основном по поверхностям естественных ослаблений, где сопротивление сдвигу и прочность на разрывы зоны контакта минимальны, что в свою очередь приводит к формированию блочно-слоевой структуры приконтурной зоны горных пород условно I мезомасштабного уровня деформации.

В зависимости от исходной структуры массива и направления воздействия главных и касательных напряжений, достигших пика своего роста, происходит развитие системы трещин, формируется трещиноватая, блочно-структурная зона, формируется зона неупругих деформаций горных пород, контур естественного равновесия массива вокруг горной выработки, что соответствует условно II мезомасштабному уровню деформации. В результате образуется многоуровневая самосогласующаяся система, в которой происходит движение отдельных структурных элементов как целого по схеме «сдвиг + поворот», а на границах их раздела происходит фрагментация материала, которая заканчивается возникновением разрывов среды. Фактически же, в стремлении массива горных пород к восстановлению равновесного состояния в резуль-

тате действующих различных нагрузок отдельности приконтурного массива смещаются внутрь выработки, а деформация же в целом, в конечном объеме, осуществляется как скольжение блоков друг по другу с вращением этих блоков относительно друг друга так, чтобы составить квазисплошную среду.

Учитывая несравненно большую энергоемкость нетронутого массива, при высвобождении энергии которого реальные нагрузки вокруг образованной полости могут составить сотни и тысячи тонн на квадратный метр, очевидно, что диссиляция основной доли энергии происходит именно в приконтурном массиве горных пород. В попытке сохранения стабильной устойчивости контура горной выработки, системы крепления фактически только сдерживают развитие деформаций II мезомасштабного уровня, предотвращая обрушение пород и последующий переход во второй цикл того же уровня, возникающий при заполнении зоны выработанного пространства и последующем радиальном смещении контура естественного равновесия вглубь массива, а волны деформации до новой компенсационной границы восстановления энергобаланса системы «массив-крепь». При этом необходимо отметить, что при применении различных технологий крепления и попытке смещения компенсационной границы ближе к области приконтурной зоны для более скорого восстановления энергобаланса, реально существующие конструкции крепей участвуют только минимально частично, фактически удерживая главным образом возможный вывал пород, происходящий за счет ползучести или разрушения приконтурной зоны.

Для обоснованности разработки эффективных систем крепления остановимся на более подробном общем рассмотрении процессов II мезомасштабного уровня деформаций приконтурной зоны горной выработки.

Как уже отмечалось, находящиеся в послепиковом состоянии горные породы приконтурной зоны блочно структурированы. Взаимодействующие в системе блоки обычно рассматриваются как практически жесткие и сплошные. Учитывая же реальную сродность деформационных процессов твердых тел от микро- до макромасштабного уровня, указанные блоки необходимо рассматривать как структурные единицы реального массива горных пород в виде мезообъемов соответствующего структурного уровня деформации.

Рассмотрим развитие напряженно-деформированного состояния системы с мгновения образования одного из структурных блоков.

В месте приложения внешней нагрузки к деформируемому твердому телу возникает базовый концентратор напряжений и генерирует все первичные сдвиги в относительно тонких поверхностных слоях блока, которые характеризуются низкой сдвиговой устойчивостью, высокой концен-

трацией микронарушений и обнаженных на поверхности свободных атомарных связей. В направлении воздействия главных напряжений происходит относительный стесненный поворот и сдвиг данного мезообъема как целого, приводящий к общему взаимосогласованному движению блоков в ограниченном объеме пространства. Таким образом, вокруг блока образуется диссиpативный слой, а за счет сил трения, сцепления и дилатансии происходит торможение общеблочно-го сдвига с образованием локальных механических полей напряжения, суммарно образующих определенную энергию при контурной зоны.

По аналогии с [4, 5] можно допустить, что при дальнейшем росте внешней нагрузки в мезообъеме гетерогенной среды единичного блока происходит волновое распространение упругих деформаций. При этом в более сложном варианте, при наличии точек генерации волн сжатия и растяжения, происходит их частичное взаимопоглощение при наложении в объеме образца (блока). Несовместность деформаций двух сред на границе их раздела приводит к возникновению на этой границе системы распределенных концентраторов напряжений, которые последовательно достигают критической величины и генерируют в объем блока деформационные дефекты: дислокации, трещины и т.п. нарушения. Данный процесс развивается как автоворонкой на микро- или мезоструктурных уровнях. В дальнейшем, блок теряет свою глобальную устойчивость и при образовании магистральных трещин разрушается, система согласованно переходит на следующий структурный (мезомасштабный) уровней деформации. Развитие деформаций системы возможно вплоть до пикромасштабного уровня с локальной неустой-

чивостью кристаллической решетки отдельных элементов.

Учитывая вышесказанное, можно сделать вывод, что для достижения максимальной эффективности крепления с позиции сохранения стабильной устойчивости контура горной выработки важно максимально возможное восстановление (повышение) исходной сплошности нарушенных зон, прочностных характеристик поверхностных слоев блоков и энергоемкости, что приводит к общему повышению сдвиговой прочности приконтурной зоны.

Подобное комплексное воздействие на структуру и физико-механические характеристики горных пород возможно при применении интегрированных в массив систем комбинированного крепления горных выработок, обладающих эффектом консолидации [лат. consolidatio, от con (cum) - вместе, заодно и solido - уплотняю, укрепляю, сращиваю]. При этом наиболее максимальный эффект консолидации приконтурного массива горных пород с технической точки зрения может быть достигнут при применении, например, инъекционного упрочнения в сочетании с анкерной крепью. Создание в дезинтегрированной приконтурной зоне новых структурных связей с одновременным напряженным армированием позволяет рассматривать данную область горных пород как несущую напряженную конструкцию,рабатывающую в непосредственном взаимодействии (взаимовлиянии) с приконтурным массивом, максимально используя его несущую способность, стабилизируя взаимные смещения и вращение отдельностей и блоков. При этом применение анкеров с активным радиальным распором на стенки скважин более активизирует описанные процессы.

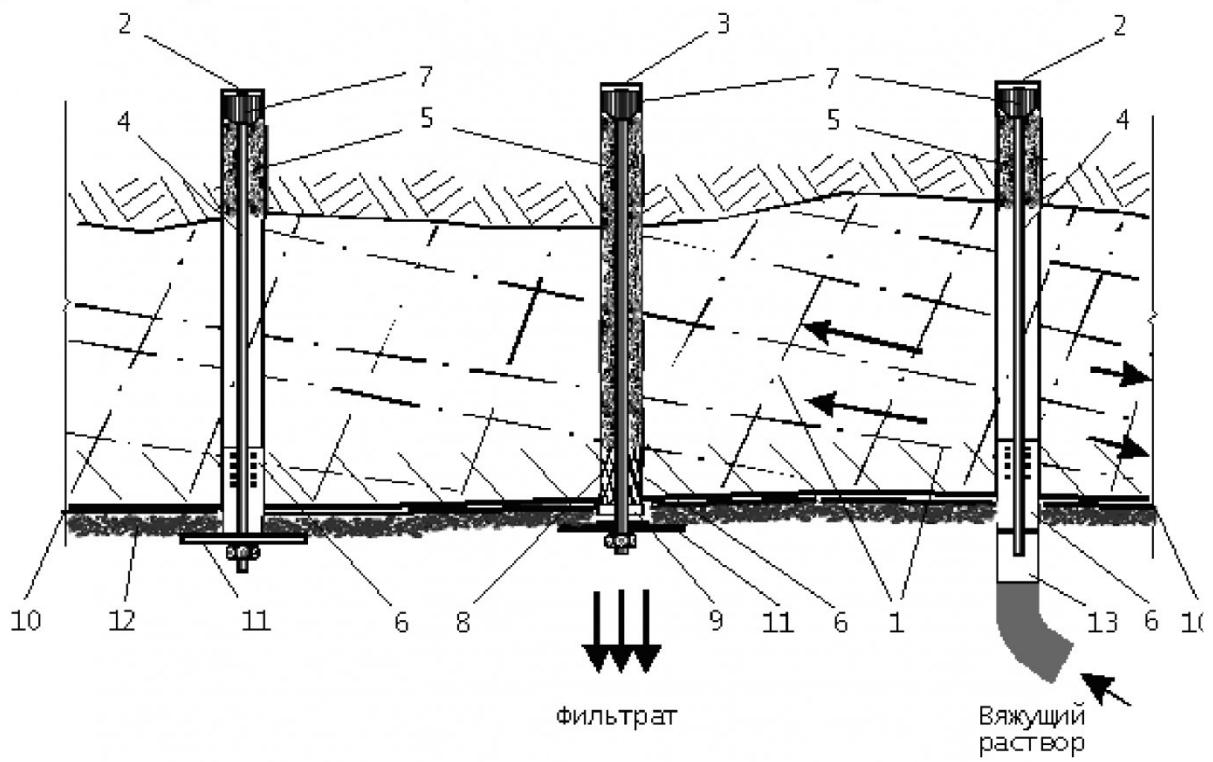


Рис.1 Схема крепления и нагнетания цементационного раствора

Перспективность подобных консолидирующих массив систем крепления очевидна вследствие их высокой надежности и низкой материалоемкости, что особенно важно при проведении капитальных выработок и выработок с длительным сроком службы в сложных условиях.

Не смотря на активно применяемые в горной промышленности составы для химического упрочнения горных пород и закрепления анкеров, вопросы экологии, низкая термостойкость и цена ограничивают объемы их применения. В настоящее время не потеряло актуальность использование цементационных составов и составов на основе минеральных наполнителей, обладающих химической инертностью, стабильность свойств во времени, сродностью структур и свойств с закрепляемыми и упрочняемыми горными породами. Также, из существующих видов анкерных крепей в данном контексте интересны беззамковые конструкции с активным радиальным распором за-крепляемой части. Например, запрессовываемые в скважину фрикционные трубчатые анкера типа Split Set и Swellex, анкеры, закрепляемые расширяющимися составами, закрепляемые сыпучим минеральным заполнителем [6]. Преимуществом последних является одна из самых низких стоимость, высокая скорость установки, надежность крепления и универсальность для ряда условий, нагружение анкера до рабочей нагрузки возможно сразу после его установки и равнопрочно с грузонесущим стержнем.

Таким образом, практическая реализация идеи консолидирующей, интегрированной в массив горных пород системы крепления, возможна, например, при внедрении технологий на базе цементационного упрочнения трещиноватой приконтуровой зоны в сочетании с анкерной крепью, за-крепляемой сыпучим минеральным заполнителем.

Рассмотрим два варианта.

В первом варианте [7] (рис.1) массив горных пород пересечен трещинами разрыва и расслоения 1. Вслед за подвиганием забоя производят бурение нагнетательных 2 и дренажных 3 скважин, располагаемых друг относительно друга в шахматном порядке с равномерным распределением по площади поверхности выработки. Скважины вскрыва-

ют трещины и расслоения массива, образуя единую систему. В нагнетательные 2 и дренажные 3 скважины устанавливают анкера 4, которые закрепляют в донной части сыпучим минеральным заполнителем 5 без подпорной шайбы. Промышленное применение данного типа крепи возможно, например, при использовании адаптированных песко斯特руйных аппаратов или специальной установки механизации процесса закрепления анкеров сыпучими материалами – УЗА СМ. Технология крепления с применением сыпучих материалов [6, 8, 9] разработана специалистами ИУУ СО РАН. В качестве сыпучего минерального заполнителя используется, например, кварцевый песок с фракцией частиц до 2 мм, обладающий к тому же фильтрационными свойствами для цементационных растворов. В нагнетательных скважинах 2 кольцевой зазор между стенкой скважины и анкером 4 заполняют кварцевым песком под головкой анкера 7 только на минимально необходимую для равнопрочного закрепления длину втулки – для скважин \varnothing 32 мм составляет не менее 50 см. В дренажных скважинах 3 кольцевой зазор заполняют кварцевым песком на их полную длину и подпирают устье фильтрующим материалом 8, например паклей. Устье дренажных 3 и нагнетательных 2 скважин закрепляют плотно вставленным перфорированным патрубком 6 с резьбовым наружным концом. Перфорированный патрубок 6 длиной 300 мм забивают в скважину, оставляя наружный конец длиной 6–7 см. На резьбовой наружный конец перфорированного патрубка 6 дренажных скважин 3 навинчивают перфорированную крышку 9 с осевым отверстием под хвостовик анкера 4. Поверхность горной выработки перекрывают стандартной сетчатой затяжкой 10, которую поджимают опорными элементами 11 и гайками,

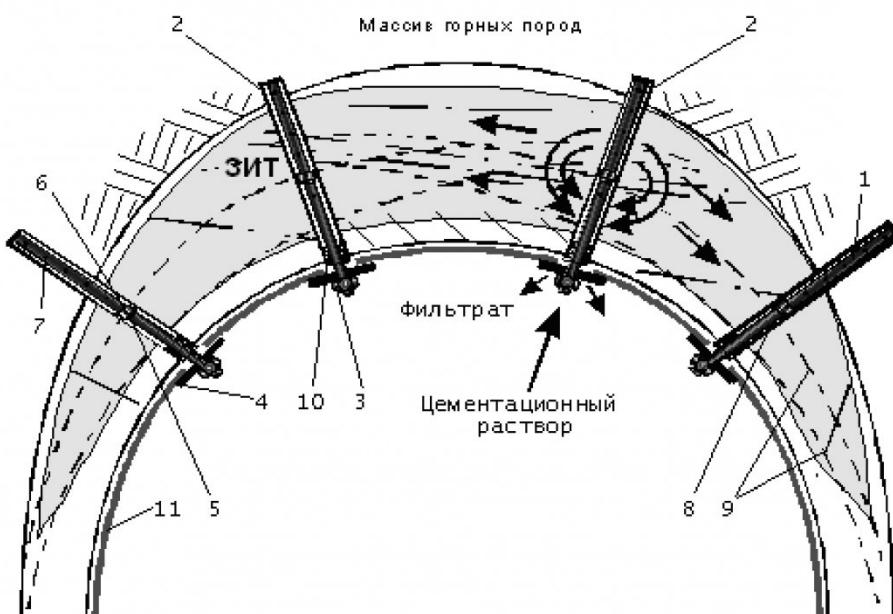


Рис.2 Схема крепления и нагнетания цементационного раствора

установленными на хвостовиках анкеров дренажных скважин 3. После смещения контура горной выработки, выбирающего заданную конструктивную податливость анкерной крепи, известными способами производят нанесение изолирующего набрызгбетонного покрытия 12 на поверхность контура выработки. При необходимости могут быть обоснованно использованы различные типы покрытий и оболочек. После процесса схватывания материала изолирующего покрытия 12 производят известными способами по скважинное нагнетание вяжущего раствора в породы через инъектор 13, присоединяемый на резьбе к наружному концу перфорированного патрубка 6 нагнетательной скважины 2.

После получасового поддержания максимального давления нагнетания вяжущего раствора в нагнетательных скважинах 2 с прекратившимся растворопоглощением, инъекторы 13 демонтируют, а на хвостовики анкеров 4 устанавливают опорные элементы 11 и гайки.

Далее, без технологических перерывов сразу производят нагружение анкеров 4, расположенных в нагнетательных 2 и дренажных 3 скважинах. Анкера 4 нагружают порядно до рабочей нагрузки, определенной паспортом крепления, в направлении от забоя выработки. Излишне выступающий наружный конец перфорированного патрубка 6 при нагружении анкера 4 гайкой через опорный элемент 11 довдавливается в скважину.

Во втором варианте [10] (рис.2) с целью создания более универсальной технологии и элементной базы разработана конструкция инъекционного анкера, позволяющая совместить процессы инъецирования и отфильтровывания излишней жидкой фазы цементационного раствора в одной скважине.

Инъекционный анкер состоит из трубчатого груzonесущего стержня 1 с резьбовой устьевой частью вне скважины 2 для навинчивания гайки 3 и тем самым натяжения анкера через опорную шайбу 4, подвижной вдоль оси опорной головки 5, которая для уменьшения податливости инъекционного анкера может быть выполнена с конической наружной поверхностью, фиксирующего элемента, например штифта 6, для фиксации опорной головки 5 на определенном участке груzonесущего стержня 1 через отверстия перфорации 7. Внутри скважины 2 расположена перфорированная часть груzonесущего стержня 1 и часть, закрепляемая сыпучим минеральным заполнителем 8 со стороны устья до опорной головки 5, при этом сыпучий минеральный заполнитель 8 в зазоре между стенками скважины 2 и груzonесущим стержнем 1 образует втулку.

После обуривания поверхности по результатам визуального зондирования скважин 2 определяют границы зоны интенсивной трещиноватости (ЗИТ см. р.2) и с учетом глубины расположения указанной зоны фиксируют опорную головку 5 на

грузонесущем стержне 1 инъекционного анкера штифтом 6 через сквозные диаметральные отверстия перфорации 7. Далее инъекционный анкер устанавливают в скважины 2 и производят закрепление, заполняя сыпучим минеральным заполнителем 8 кольцевой зазор между стенкой скважины 2 и груzonесущим стержнем 1 инъекционного анкера. Далее устье скважины 2 подпирают фильтрующим материалом 10, например паклей. На поверхность горной выработки по известной технологии наносят изолирующее набрызг-полимерное крепление 11, например Тифлекс (продукт фирмы Минова КарбоТех ГмбХ, Германия) толщиной 4-6 мм, оставляя свободными устья скважин 2. Набрызг-полимерное крепление 11 выполняет роль временной крепи и изолирует поверхность выработки, предотвращая при инъецировании цементационного раствора его вытекание из трещин 9. После полимеризации набрызг-полимерного крепления 11 на хвостовики инъекционных анкеров, расположенные внутри выработки, надевают опорные шайбы 4 и накручивают стандартные гайки 3. Далее, по известным способам и методикам производят по скважинное нагнетание цементационного раствора в породы через трубчатый груzonесущий стержень 1 каждого инъекционного анкера и производят предварительное нагружение инъекционных анкеров стандартными гайками 3 через опорные шайбы 4.

В соответствии с [11] при нагнетании вяжущего раствора в нагнетательные скважины в какой-то момент времени наступает прекращение их растворопоглощения. Последующая выдержка нагнетательных скважин под максимальным давлением нагнетания вяжущего раствора позволяет произвести более плотную упаковку частиц, отжать часть жидкой фазы вяжущего раствора, которая при преодолении гидравлического сопротивления дренажных скважин дренирует в выработку. Но, данный процесс происходит только лишь под действием давления нагнетания, при котором рост плотности частиц вяжущего раствора имеет предел и далее не зависит от роста давления нагнетания. Также происходит неравномерное распределение частиц цемента по длине трещин за счет седimentации и отфильтровывания жидкой фазы по длине потока.

Нагружение анкера приводит к его закреплению в скважине за счет сил трения, сцепления и дилатансии в сыпучем минеральном заполнителе, реализующих активную во времени радиальную составляющую, что способствует объемному сжатию отдельностей и блоков горных пород, составляющих непосредственно контур выработки. Дальнейшее порядное нагружение анкеров, расположенных в нагнетательных и дренажных скважинах, в направлении от забоя выработки (в сторону ранее упрочненных горных пород) создает эффект волнового распространения вяжущего раствора по трещинам и расслоениям, повышая

эффект отжатия жидкой фазы, равномерность и плотность упаковки частиц вяжущего раствора, его прочностные и адгезионные характеристики. При этом происходит более эффективная сшивка и объемное сжатие упрочняемых пород приконтурной зоны закрепляемой горной выработки с одновременным их поджатием к устойчивой части массива. Большая величина нагружения анкерной крепи позволяет реализовать более активное принудительное разнонаправленное сближение плоскостей трещин и расслоений. Вяжущий раствор, не имея другого выхода, дополнительно проникает в незаполненные трещины и поры, а избыточная отжимаемая жидкая фаза (фильтрат) вяжущего раствора начинает истекать в выработку. При этом важно, что при инъекционном упрочнении горных пород происходит не только восстановление макро сплошности за счет заполнения центральных трещин цементационными растворами, но и упрочнение наружной поверхности блоков, состояние которой играет определяющую роль в развитии общей деформации контура выработки.

Максимальный отжим жидкой фазы важен также вследствие потери со временем прочности горных пород находящихся в напряжен-

деформированном состоянии, а соответственно и последующего уменьшения их несущей способности. Это происходит не только за счет «усталости» или временно го охрупчивания с образованием новых микротрещин, но и за счет снижения поверхностной энергии при более или менее полной компенсации обнаженных на поверхности отдельностей связей адсорбирующими из раствора ионородными атомами или молекулами [12].

С позиции строительства в вышеуказанных технологиях основной объем необходимых материалов при сооружении крепи составляют непосредственно горные породы приконтурной зоны, при этом объем инъекционного состава не превышает объема трещин и пустот (конечно с технологическим допуском), плюс анкерная крепь в комплекте. Таким образом, относительно низкая стоимость, материалоемкость и надежность данного вида крепления, возможность полной механизации технологических процессов представляют привлекательность для дальнейших научных исследований и более широкого практического внедрения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ :

1. Шемякин Е.И. О прочности горного массива.// Научные сообщения ННЦ ГП – ИГД им. А.А.Скочинского. Выпуск 328/2004. - С.8-18.
2. Ревуженко А.Ф., Стажевский С.Б., Шемякин Е.И. О структурно-дилатансионной прочности горных пород. ДАН СССР. – 1989. – Т.305. – №35. – С.1077-1080.;
3. Шемякин Е.И. Синтетическая теория прочности. // Физическая мезомеханика. – 1999. – Т.2. - №6.
4. Панин В.Е, Лихачев В.А., Гриняев Ю.В. Структурные уровни деформации твердых тел. Новосибирск: Наука, 1985. 229 с.
5. Панин В.Е. Физическая мезомеханика материалов – новое направление на стыке физики и механики деформируемого твердого тела. // Современные проблемы науки: Материалы научной сессии. Новосибирск, 25-26 ноября 2003 г. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. – 228 с.
6. Анкерное крепление на шахтах Кузбасса и дальнейшее его развитие: учебное пособие/ А.В.Ремезов, В.Г.Харитонов, В.П.Мазикин и др. – Кемерово: Кузбассвязиздат, 2005. – 471 с.
7. Патент РФ № 2283959. Способ крепления горных выработок. Хямляйнен В.А., Майоров А.Е., МПК E21D 20/00, E21D 11/00, опубл. 2006.09.20, Бюл. № 26.
8. Патент РФ № 2166635. Анкер с минеральным заполнителем В.Е.Ануфриев, З.М.Гараев, А.Е.Майоров. МПК E21D 21/00, опубл. 2001.05.10
9. Патент РФ № 2166634. Установка закрепления анкера сыпучими материалами / В.Е.Ануфриев, В.В.Барковский, А.Е.Майоров, А.А.Родичкин. МПК E21D 20/00, опубл. 2001.05.10
10. Заявка на изобретение №2006132158/03(034961). Способ крепления горных выработок и устройство для его осуществления / В.А.Хямляйнен, А.Е.Майоров.
11. Хямляйнен В.А., Бурков Ю.В., Сыркин П.С. Формирование цементационных завес вокруг капитальных горных выработок. – М.: Недра, 1994. -400 с: ил.
12. Воронков Г.Я. Влияние среды на процессы деформирования и разрушения горных пород в условиях напряженного состояния. // Научные сообщения ННЦ ГП – ИГД им. А.А.Скочинского. Выпуск 328/2004. - С.19-25.

□ Автор статьи:

Майоров
Александр Евгеньевич
соискатель каф. теоретической
и геотехнической механики