УДК 622.1:528.02+528.5+622.834

В.Н.Гусев, Р.А.Такранов, Е.М.Волохов,
А.С.Зарукин, В.В.Зверевич, С.П.Павлов, А.Н.Шеремет
Санкт-Петербургский горный ин-т, Россия

ОЦЕНКА И ПРОГНОЗ ТЕХНОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ГОРНЫХ РАЗРАБОТОК НА ГЕОЛОГИЧЕСКУЮ СРЕДУ

В статье приведены методы оценки техногенного воздействия горных разработок на геологическую среду, статистико-вероятностные модели распределения качественных показателей для районирования месторождений. Изложены основы методики использования GPS-аппаратуры и электронных тахеометров при мониторинговых наблюдениях за сдвижением горных пород, эргономика проведения этих наблюдений.

In the article the methods of an estimation of technogenic effect of mining minings on geologic medium, statistical and probabilistic models of distribution of quality indicators for the geographical demarcation of fields are adduced. Are set up to a fundamentals of the theory of operation GPS of instrumentation and electronic tacheometers at overseeing ground movement of rocks, ergonomics of realisation of these supervision(observations).

Работа выполнялась в рамках научно-технической программы Министерства образования РФ «Научные исследования высшей школы по экологии и рациональному природопользованию». Коллективом кафедры маркшейдерского дела был составлен проект научно-исследовательских работ на 2000 год по разделу этой программы «Рациональное использование минеральных ресурсов и проблемы охраны природной среды». Основные научные результаты, полученные при работе над проектом, изложены ниже.

Извлечение полезного ископаемого из недр связано с нарушением естественного напряженного состояния массива горных пород, приводящего к развитию сдвижений и деформаций. В результате этих процессов в слоях толщи образуются техногенные трещины, в том числе и водопроводящие. Для определения деформаций и выявления зон техногенных трещин были проанализированы результаты проведенных натурных и лабораторных экспериментов. Особое внимание было уделено тем экспериментам, где исследовались процессы образования техногенной нарушенности слоев массива при его многократных подработках. Анализ результатов таких исследований выявил общую тенденцию протекания деформаций: процессы образования техногенных трещин при повторных подработках развиваются в слоях массива в пределах тех структурных нарушений, которые образовались при первичной подработке. При выемке первого пласта свиты в массиве образуются две взаимно перпендикулярные системы трещин техногенного характера: трещины расслоения и нормальносекущие трещины. При определенном значении деформаций кривизны, называемом граничной

кривизной, нормальносекущие трещины развиваются до сквозных. Слои, имеющие изгиб больший или равный значению граничной кривизны, образуют над пластом зону водопроводящих трещин (ЗВТ). Слой с изгибом, равным граничной кривизне, является верхней границей ЗВТ. Установлена зависимость положения этого слоя от литологического состава пород толщи.

Аналитические исследования геомеханических процессов с использованием теории кривых давления при изгибе слоев показали, что развитие ЗВТ зависит также от местоположения в толще пород с различными физико-механическими характеристиками:

$$K_{\text{г}} = \left(1{,}6e^{A} \frac{\sum_{1}^{n} p_i l_i}{H \sum_{1}^{n} p_i} \right) 10^{-3}, \qquad (1)$$

откуда

$$H_T = 50 \sqrt{\frac{m e^{-A} H \sum_{1}^{n} p_i}{\sum_{1}^{n} p_i l_i}}, \qquad (2)$$

где $K_{\text{г}}$ – граничная кривизна; H_T – высота ЗВТ; A – содержание пород глинистого состава; p_i – давление при изгибе i-го слоя с учетом его взаимодействия с соседними слоями; l_i – расстояние от пласта до i-го слоя; H – глубина отрабатываемого пласта; n – количество подрабатываемых слоев.

С учетом геомеханических процессов первично подработанного массива и особенностей многократных изгибов слоев при повторных подработках было получено уравнение накопления деформаций на верхней границе ЗВТ:

$$K_{\text{г}} = 4m_1 / H_{Tn}^2 + \\ + 4\left[\sum_{i=2}^{n} a_i m_i \left(\frac{S_i - S_i'}{S_i} \right) \right] \Big/ \left(H_{Tn} + \sum_{i=1}^{n-1} N_i \right)^2, \qquad (3)$$

где $K_{\text{г}}$ – определяется по формуле (1); H_{Tn} – высота ЗВТ над верхним пластом от совместной выемки n пластов; a_i – коэффициент, учитывающий активизацию процесса сдвижения при выемке второго и последующих пластов свиты; S_i – расстояние между нижними (верхними) границами горных выработок пластов первого и i-го, на котором граничная кривизна не увеличивается; S_i' – сближение или удаление нижних (верхних) границ выработок первого и i-го пласта в пределах S_i; $m_1, m_2, \ldots, m_n$ – вынимаемые мощности пластов свиты; $N_1, N_2, \ldots, N_{n-1}$ – мощности междупластий.

Уравнение (3) является основой прогнозных расчетов развития техногенных водопроводящих трещин, что позволяет оценивать степень техногенного воздействия на массив. Кроме того, в уравнении (3) заложен алгоритм управления процессами развития водопроводящих трещин для снижения их воздействия на геологическую среду.

Изучение техногенного воздействия на геологическую среду при сооружении тоннелей метрополитенов проводилось аналитическим и конечно-элементным методами. Первое базируется на представлениях механики сплошной среды (МСС) и использует ее основательно проработанный математический аппарат. Второе призвано реализовать математическое моделирование указанных процессов на основе использования метода конечных элементов (МКЭ).

В рамках аналитического направления был проведен анализ теоретических разработок в области МСС. Подавляющее большинство прикладных работ в этой области посвящены вопросам горного давления и нарушения породного массива вблизи выработки. Немногочисленны попытки применить подобную методологию к изучению процессов сдвижений и деформаций как массива вокруг выработки, так и земной поверхности над ней. Между тем результаты работы показывают, что описание процесса сдвижения в аналитических функциях вполне оправданно именно с позиции принципа достоверности. Универсальные методы плоской теории упругости акад. Н.И.Мусхелишвили позволяют находить поле перемещений вокруг ослабляющего некоторую область отверстия. Методы, разработанные проф. С.Г.Лехницким, дают возможность получать аналогичные решения для анизотропных сред. Работы Г.Н.Савина, М.П.Шереметьева и других позволяют учитывать наличие в упомянутом отверстии подкрепляющих его элементов. Метод упругих решений А.А.Илюшина дает возможность учесть нелинейность путем последовательного приближения с использованием эмпирической кривой, за первое приближение в методе принимается собственно упругое решение. Феноменологическая теория ползучести Ж.С.Ержанова позволяет учесть временно́й фактор в подобного рода задачах. Таким образом, при наличии достаточной совокупности исходных данных становится возможным при математическом описании сдвижений массива горных пород при проходке тоннельных выработок учесть анизотропность пород, влияние крепи, нелинейность деформационных процессов, а также фактор времени.

Одним из результатов данной работы явилось создание новой методики расчета основных параметров мульды сдвижения земной поверхности при проходке тоннелей в кембрийских глинах применительно к условиях санкт-петербургского метро на основе решения для трансверсальной среды, ослабленной эллиптическим отверстием, заполненным упругим ядром (моделирующим крепь). Данная методика прогноза параметров техногенного воздействия показала удовлетворительную сходимость с реально измеренными в натуре параметрами.

Мониторинговые наблюдения за процессом сдвижения горных пород с помощью геодезических приборов на протяжении нескольких десятков лет являются наиболее распространенным способом получения объективной информации о происходящих изменениях покрывающей толщи пород. Применение этих способов в некоторых случаях представляет большие трудности (гористый рельеф местности, наблюдения за деформациями бортов карьеров). Кроме того, они малопроизводительны. При наблюдениях на больших территориях, например при разработке нефтяных и газовых месторождений, эти способы требуют больших затрат времени.

В связи с выпуском электронных тахеометров и нивелиров, а также аппаратуры спутникового определения координат (GPS) существенно меняется и методика дистанционного контроля за подрабатываемой территорией. Основной характеристикой, которая в полной мере отражает процесс сдвижения подрабатываемой толщи, является полный вектор смещения реперов. Применение современных

приборов позволяет получить эти характеристики с высокой точностью при минимальных затратах времени.

Наблюдения могут проводиться не только по профильным линиям, но и по площади. Применение электронных тахеометров с активными отражателями полностью автоматизирует не только процесс вычисления координат реперов, но и съемку. Точность определения координат электронным тахометром пропорциональна расстоянию между прибором и репером, поэтому для сохранения высокой точности рекомендуется определять положение базовых (опорных) реперов с помощью аппаратуры GPS. Проведенные исследования показывают, что точность этого метода составляет 5-7 мм, но время определения координат (полевые работы) одной точки составляет 20-25 мин, поэтому целесообразно применять комбинированную схему, при которой электронные тахеометры устанавливаются на базовые реперы, координаты которых определяются методом DGPS.

Для работы с электронными тахеометрами разработана конструкция фиксации отражателей на рабочих реперах. При этом происходит автоматическое центрирование отражателя на репере, что повышает точность измерений и производительность труда.

Мониторинг сдвижения горных пород, проводимый маркшейдерской службой, выполняется маркшейдерской эргатической системой (МЭС), которая является централизованной полиэргатической системой «маркшейдер – прибор – среда». Комплексное диалектичное рассмотрение функционирования этой МЭС приводит к необходимости учета воздействия не только среды на качество выходной продукции (точность результатов наблюдения), но и самой МЭС на экологическую ситуацию в районе мониторинговых наблюдений. Это воздействие во многом обусловливается деятельностью исполнителей маркшейдерских работ. Психофизиологическое состояние маркшейдера и его помощников исследовалось по специально разработанной методике компьютерного тестирования. Тестирование, выполненное до нивелирования и после него, показало, что, во-первых, эта методика применима при нивелирных работах и, во-вторых, лица пожилого возраста испытывают дополнительную (бóльшую) нагрузку при мониторинге сдвижения горных пород, чем лица зрелого возраста или молодые.

Повышение эффективности технологических процессов горного производства является одним из направлений повышения экологичности разработки угольных месторождений. Так, при взрывном рыхлении добычных уступов при отработке сложноструктурных угольных пластов необходимо для каждого взрываемого блока знать прочностные свойства. Определение прочности (крепости) в этом случае представляет собой трудоемкую работу. В то же время прочность породы (угля) определяется ее составом, в частности соотношением минерального и органического материала, которое оценивается содержанием золы. Анализ статистических данных определения зольности (A^d) и крепости (f), выполненных на экибастузских угольных карьерах, показал наличие корреляции f от A^d. Это дает возможность косвенным путем по данным текущего опробования и определения A^d оценивать крепость f конкретного блока заходки, подлежащего взрыванию.

Важной задачей маркшейдерского и геологического обеспечения разработки является снижением объема трудоемких работ по опробованию и лабораторному испытанию показателей качества и свойств, которые используются для определения количества и качества добываемого угля. С этой целью используются аналитические способы расчета зольности и плотности на основе установленных корреляционных связей.

Необходимой составляющей при геометризации недр является изучение трещиноватости, отличающейся массовым проявлением в горных породах, и построение диаграмм трещиноватости. Диаграммы позволяют в наглядной форме изображать и пространственно ориентировать системы трещин, а также объективно выделять из всей совокупности трещин их системы и определять вероятные средние значения элементов залегания.

Существующие методики ручного построения диаграмм достаточно трудоемки, а при выделении систем и построении изолиний плотности полюсов трещин неоднозначны, особенно при плохой выраженности (аномальности) групп полюсов и большом разбросе ориентировки трещин одной системы. Кроме того, стереографические изображения ориентированных структур содержат значительные искажения при переносе на диаграммы.

Для автоматического построения диаграмм трещиноватости и статистической обработки замеров ориентировки разработана компьютерная программа Crack Ars (авторы А.С.Зарукин и Р.А.Такранов). Программой предусмотрено построение наиболее распространенных видов диаграмм в прямоугольных и полярных (круговых) координатах с изображением трещин в виде полюсов (точек) и изолиний плотности (частоты) полюсов, а также роз- и лучевых круговых диаграмм.

Наибольшее внимание в наших разработках уделено сложным в построении и обработке круговым точечным диаграммам с изолиниями относительной плоскости полюсов. Такие диаграммы отличаются наибольшей наглядностью, информативностью, достоверностью выделения систем и точностью оценки их средней ориентировки.

Программное обеспечение разрабатывалось на основе следующих предпосылок. При стереографическом проектировании плоскость отображается гномонической проекцией-полюсом, который образуется как точка пересечения с полусферой перпендикуляра к плоскости, расположенной в центре полусферы. Ориентировка перпендикуляра и координаты полюса на полусфере, а также и его проекции на диаграмме определяются элементами залегания плоскости (α, δ). Данный перпендикуляр подобен радиусу-вектору с полярными (сферическими) координатами (α, δ), которому на полусфере соответствует полюс. Группе сближенных полюсов соответствует пучок векторов в ограниченном пространственном (телесном) углу с вершиной в центре полусферы. Разброс или концентрация полюсов на полусфере оценивается как значением пространственного угла, так и соответствующей площадью на полусфере, на которой расположена рассматриваемая группа полюсов. Таким образом, степень пространственной сближенности ориентировки трещин и проявления их как системы оцениваются пространственным углом между векторами и соответствующей площадью (сферическим сегментом) на полусфере.

В программе реализован алгоритм получения среднего значения элементов залегания систем трещин и стандартного отклонения отдельных замеров в системе. Получению основных статистических характеристик предшествуют операции, связанные с выделением среди всего множества замеров тех из них, которые относятся к системам.

В заключение отметим, что в принятых алгоритмических предпосылках компьютерной технологии построения диаграмм трещиноватости и определения основных статистических характеристик ориентировки использовано пространственное соотношение ориентированных элементов в сферической системе координат при векторном отображении ориентировки трещин и сопоставление плотности полюсов непосредственно на сфере.

Таким образом, комплексный подход к оценке геомеханического состояния геологической среды и распределений качественных показателей пород и полезного ископаемого в районах деятельности горных предприятий, а также мониторинговые наблюдения за техногенными изменениями подрабатываемых массивов и поверхности позволяют рационально использовать недра, оперативно вносить коррективы в технологические процессы, уменьшая техногенное воздействие на геологическую среду.