

- результаты многофакторного анализа позволили определить качественную структуру зависимости показателя величины распространения нарушения над сопряжением от горно-технологических и горно-геологических условий;
- установлено, что на величину распространения нарушений крепи над сопряжением наибольшее влияние оказывают три фактора: дирекционный угол оси сопряжения, отношение $R_t/\gamma H$, отношение ширины сопряжения к диаметру ствола в свету $B/D_{св}$;
- получены аналитические выражения для определения высоты распространения нарушений крепи по стволу в зависимости от приведенных выше факторов;
- на базе полученных прогностических моделей статистического типа и метода многофакторного анализа (МГУА) получена математическая модель, которая учитывает влияние всех выявленных факторов $h_{нар} = f(A, R_t/\gamma H, B/D_{св})$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Научное открытие № 131, от 14 декабря 1999 г. Закономерность изменения устойчивости обнажений в выработках / А.Н. Шашенко, В.Г. Агеев, С.В. Кужель, Е.А. Сдвижкова, С.Б. Тулуб.
2. Исследовать геомеханические факторы и разработать методику проектирования горизонтальных горных выработок глубоких угольных шахт на основе вероятностно-статистического подхода. Отчёт по НИР. – Днепропетровск. изд. ДГА. – 1995. – 74 с.

УДК 622.831

Б.М. Усаченко, А.А. Яланский, В.В. Левит,
А.Г. Заболотный, Т.А. Паламарчук, В.Н. Сергиенко

ОСОБЕННОСТИ И СВОЙСТВА ЯВЛЕНИЯ САМООРГАНИЗАЦИИ В НАПРЯЖЕННЫХ ГРУНТОВЫХ И ПОРОДНЫХ МАССИВАХ ВОКРУГ ПРОТЯЖЕННЫХ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ СТРУКТУР

Наведені комплексна методика та результати геофізичних досліджень явища самоорганізації в напружених ґрунтових та породних масивах навколо протяжних геомеханічних структур.

SPECIAL AND PROPERTIES OF SELFORGANIZATION PHENOMENON IN STRESSED SOIL AND ROCK MASSIVES AROUND OF THE EXTENSIONAL GEOMECHANICAL STRUCTURES

Composite methodic and geophysical investigation results of selforganization in stressed soil and rock massives around of the extensional geomechanical structures are represent.

Проведение горных выработок, скважин большого диаметра, шпуров связано с образованием вокруг них различных зон трещиноватости, опорного давления, повышенной газоопасности или увлажнения, в основном подчиняющихся волновым закономерностям. На малых глубинах разработки процесс разрушения породного массива имеет причинно-следственный характер. С ростом глубины, когда величины напряжений становятся соизмеримыми с прочностью пород, разрушение усиливается, лавинообразно растет количество различных типов очагов разрушения, природа разрушения также становится

более многообразной: разрушение хрупкое, пластическое, сколы на дислокациях, трещинах и микротрещинах, с накоплением повреждений и газа [1].

Комплексные геофизические исследования стволов, протяженных горных выработок, тоннелей показали, что формирование заобделочных пустот, напряжений, трещиноватости подчиняется различным закономерностям, которые определяются как горно-геологическими условиями, так и горнотехническими факторами, в том числе и технологическими особенностями проведения выработок, к которым относятся: способы и средства проходки; вид и тип крепи, цикличность и повторяемость элементов, условия и средства забутовки закрепленного пространства; горно-геологические условия, глубина разработки и физико-механические свойства породного массива, тектонические и гидрогеологические условия, газоносность [2]. Однако такое модельное представление геомеханики физических процессов уже не отражает в полной мере особенности поведения подработанной толщи в условиях динамического воздействия на массив, а контроль таких объектов становится чрезвычайно сложным и требует статистической обработки результатов измерений.

С ростом глубины и увеличением потока энергии происходит переход от регулярных, сложно организованных геомеханических структур, произвольно изменяющихся со временем, к хаосу, критерием которого служит степень их устойчивости по отношению к малым возмущениям. Снижение устойчивости структур приводит к тому, что возникает необходимость перехода от их детерминированного описания к конструктивному рассмотрению проблем синергетики, рассматривающей теоретические аспекты хаотизации регулярных структур [3, 4].

В качестве объектов исследований нами выбраны протяженные выработки горизонтального и вертикального заложения, проведенные в грунтах и горных породах, а именно: тоннели, стволы шахт, капитальные и подготовительные выработки, а также их сопряжения, очистные выработки при механизированной отработке крутопадающих пластов, камеры рудных и нерудных месторождений. Следует отметить, что в настоящее время до сих пор не раскрыты механизм протекающих процессов, суть явления накопления дислокаций и поэтапного разрушения породного массива, существенно искажены подходы в выборе информативных параметров исследуемых объектов и критериев управления проявлениями горного давления. Самые прочные крепи разрушаются, породы и грунты деформируются, а стоимость добычи и эксплуатации подземных сооружений увеличивается. Поэтому создание методики текущего контроля и прогнозной диагностики состояния геомеханических систем с учетом их структурной неоднородности и синергетических процессов, происходящих в массиве горных пород, также имеет важное научное и народнохозяйственное значение для повышения безопасности труда и эффективности ведения горных работ.

Геофизические исследования – неотъемлемая часть комплекса работ по оценке состояния породного массива приконтурной зоны стволов и сопряжений, стволов и тоннелей, выполняемой как для характеристики их технического состояния, так и для выбора эффективных мероприятий с целью безопасной их

эксплуатации в будущем. Методы и средства геофизического контроля использованы для решения задач диагностики и оценки: нарушенности незакрепленного породного массива; состояния породного массива с искусственным изменением показателей его физико-механических свойств, например, путем тампонажа; влияния параметров залегания пород, окружающих выработки, на устойчивость контура; напряженно-деформированного состояния на сопряжении стволов с горизонтальными выработками; эффективности применения различных видов крепи в стволе и на сопряжениях; качества выполнения различных видов обделки вертикальных стволов, а также состояния горизонтальных, наклонных выработок и тоннелей.

Для оценки состояния породного массива, крепи стволов и тоннелей применена комплексная методика, включающая выполнение виброакустической диагностики с картированием выявленных аномалий, инструментальные геофизические и геомеханические измерения, визуальные наблюдения. Виброакустическая диагностика выполнена с целью выявления заоболочечных пустот, оценки состояния и нагруженности крепи, толщины и размеров цельных и отслоившихся участков. Ее реализация основана на изучении закономерностей свободных колебаний кольцевой или топологически подобной ей оболочки, возбуждаемой точечным ударом. С учетом поставленных задач контроля применены следующие варианты виброакустической диагностики: простукивание обнаженной поверхности породного массива после выполнения буровзрывных работ и оборки, поверхности крепи ствола, тоннелей и выработок, рам арочной крепи, анкеров, рельсового пути и прочее. Для незакрепленной поверхности основными аномальными участками с повышенной амплитудой виброакустического сигнала являются отслоения и заколы.

Для оценки состояния крепи ствола на сопряжениях, а также в приконтурных зонах капитальных и подготовительных выработок отработан комплекс методов, включающий глубинные электрометрические измерения (вертикальное электрическое зондирование, профилирование и зондирование шпуров и скважин), регистрацию естественного электромагнитного излучения, а также виброакустическую диагностику с изменением базы контроля и силы удара, в первую очередь, наиболее простым методом за счет применения ударников различной массы. В качестве дополнительного использован метод оценки трещиноватости массива по изменению его электромагнитных свойств. Взаимодополняющая информация, полученная различными методами, в комплексе с визуальными наблюдениями позволяет дать объективную характеристику состоянию крепи и ее взаимодействию с породным массивом.

В основу проведенных исследований заложены экспресс-методы оценки свойств и состояния крепи и массива, отличающиеся высокой производительностью и информативностью контроля, в то же время электрометрический метод позволяет получить информацию о состоянии закрепной части породного массива путем профилирования или зондирования по предварительно пробуренным шпурам, а также вертикального электрического зондирования в случае свободного доступа к породному массиву. Диаметр шпура – от 42 до 50 мм. Длина шпуров должна быть не менее 3 м. Разнос питающих электродов при

профилировании должен составлять порядка 0,5 м. Его увеличение повышает глубину зондирования в окрестности шпура, однако увеличивает и размер неконтролируемых участков возле устья и забоя шпура.

Исследование локальных участков повышенных механических напряжений также производилось путем регистрации импульсного электромагнитного излучения.

Как правило, состояние на контуре закрепленной выработки определяется суммой случайных факторов. Крепь стволов и протяженных выработок представляет собой монолитную (по проекту) бетонную или железобетонную трубу диаметром порядка 7 м и толщиной стенок в пределах 0,3-0,5 м. Наиболее типичной причиной появления участков с повышенной амплитудой свободных колебаний является отсутствие плотного контакта с окружающим породным массивом, что может быть вызвано образованием пустот или плохой забутовкой заобделочного пространства. На сдеформированных участках крепи подобные аномалии могут быть вызваны нарушением сплошности самой крепи, внутренними расслоениями и нарушением связи между блоками конструкции.

Следует отметить, что шахтный ствол является специфическим объектом исследования, отличающимся от горизонтальных выработок как по геомеханическим характеристикам, так и по техническим возможностям при проведении измерений. При этом, в первую очередь, учитывались следующие особенности: асимметрия условий по контуру ствола, вызванная определенной ориентацией угла падения пород; значительная увлажненность контура; ограниченная возможность разнесения точек измерения в вертикальной плоскости. При выборе участков для проведения измерений, прежде всего, оценивалась степень однородности горно-геологических условий в избранном горизонтальном сечении для оценки изменения их свойств по фактору потенциальной энергии.

Наиболее часто породный массив в окрестности шахтного ствола в Донбассе сложен сланцами. Прочные песчаные и песчано-глинистые сланцы встречаются несколько чаще, чем более слабые глинистые сланцы. Незначительная часть стволов проходит в известняках и других породах, включая полезное ископаемое – уголь. Песчаник и известняк отличаются значительной прочностью, склонностью к хрупкому разрушению и значительной водопроницаемостью.

С использованием комплекса геофизических методов и длительных инструментальных измерений исследовано состояние системы "крепь ствола - породный массив" на 47 участках 14 шахт Донбасса в широком диапазоне глубин – от 75 м до 1291 м. Преобладающее большинство исследуемых выработок было закреплено монолитной бетонной крепью – 84,9 %. Остальные виды крепи представлены в следующем процентном соотношении: монолитная железобетонная – 8,1; тубинговая металлическая – 3,1; тубинговая железобетонная – 0,9; многослойная комбинированная – 0,6. Длительные наблюдения за устойчивостью стволов показали, что на участках, пройденных в крепких породах, крепь выполняет в основном функцию ограждающей. Ее деформации, как правило, приходится на участки со слабыми породами на контуре. Дополнительным фактором отрицательного влияния на устойчивость крепи могут быть

расположенные вблизи ствола выработки. Проведены измерения вдоль выработок, примыкающих к стволам, что позволило расширить глубинность контроля и оценить влияние ствола на прилегающий массив.

Проведенные исследовательские работы показали эффективность разработанной комплексной методики для оценки состояния крепи ствола, в особенности при возможности непосредственного доступа к ее поверхности. Использование для проведения измерений проходческих полков в период проходки или ремонта позволяет детально обследовать сравнительно небольшие участки поверхности ствола. Практические потребности во многих случаях сводятся к необходимости оперативной диагностики состояния ствола по всей его длине. Естественно, что измерения при этом выполняются с проходческой бадьи или с шахтной клетки. Наиболее приемлемым методом для бесконтактного дистанционного контроля состояния окружающего массива является регистрация электромагнитного излучения.

Канал "Днепр – Донбасс" – важнейшая водная артерия для снабжения питьевой водой города Харькова (Донбасса путем сброса воды самотеком) и прилегающих населенных пунктов. В зоне водораздела через перевал построены и эксплуатируются в течение двух десятилетий два тоннеля, длины каждого из которых превышают 3 км. Оба тоннеля построены с применением различных технологий, но имеют в поперечном сечении равные размеры. На отдельных участках тоннелей применены различные виды крепи, однако основным видом крепи является сборная унифицированная железобетонная обделка. Тоннели обследованы в летне-осенний период 2001 года по единой методике. Основные вмещающие породы – глинистые и песчано-глинистые грунты. Результаты визуальных наблюдений состояний водопропускных тоннелей свидетельствуют о том, что их поверхность нарушена неравномерно. Так, хотя центральные части тоннелей в промежутке от 600 м до 2000 м имеют практически ненарушенные песчано-цементные оболочки, присутствуют другие формы нарушения. В частности, имеются участки капежа, что свидетельствует о наличии геофильтрационных процессов в окружающей грунтовой толще. Фильтрация воды в тоннеле на протяжении длительного времени в сочетании с недостаточной вентиляцией привела к образованию обширных зон сульфатации поверхности. Своеобразной формой нарушения, характерной именно для данных объектов, является вспучивание днища. Чаще всего оно проявляется в виде овальных поднятий верхнего покрытия без его разрушения. Бурение на одном из таких участков вызвало фонтанирование напорной воды, которое, однако, быстро иссякло. Характерно, что большая часть основания тоннеля под вспучившимся верхним слоем не нарушена, что, по-видимому, объясняется превышением коэффициента фильтрации бетона на отдельных участках по сравнению с коэффициентом фильтрации верхнего слоя, что приводит к аккумуляции воды между слоями, давление которой за длительное время выравнивается с гидростатическим давлением грунтовой толщи.

Циклические годовые перепады температуры в начале и конце тоннелей привели к более сильной его нарушенности, чем в центральной части. Основная форма разрушения песчано-цементного слоя – локальные выколы площадью до

нескольких квадратных метров. Появлению выкола предшествует образование трещин из-за влияния температурных напряжений. Наиболее плохое состояние тоннеля наблюдается на расстоянии нескольких сотен метров от концов. Дополнительным фактором разрушительного воздействия на бетонную оболочку является замерзание воды на ее поверхности и в трещинах в зимнее время. Многолетнее циклическое воздействие привело к образованию обширных участков с обнажением арматуры. В результате выполненных исследований установлено, что нарушенность тоннелей представлена следующими основными формами: разрушение песчано-цементного слоя без обнажения арматуры и с ее обнажением и коррозией; сульфатация поверхности, преимущественно в виде поперечных полос; пучение днища без разрушения и с разрушением поверхностного слоя; точечный капеж, преимущественно со свода тоннеля.

При проведении в массиве горных выработок, скважин или наличии различных геологических возмущений происходит нарушение состояния равновесия, в котором находился массив горных пород до геологического или техногенного воздействия, и начинают интенсивно протекать процессы трещинообразования, длящиеся до тех пор, пока не разрушатся все наиболее слабые связи и не выделится энергия, накопленная под воздействием горного давления и техногенного воздействия. При этом массив перейдет в новое квазистационарное состояние.

Рассмотрим более подробно процесс трещинообразования породного массива, вызванный тем или иным внешним воздействием. Известно, что прочность твердых тел характеризует их сопротивление разрушению и определяется силами межатомной связи и структурой тела. При оценке теоретической прочности ионного кристалла Я.И. Френкель предположил, что разрушение происходит вследствие одновременного сдвига атомных плоскостей относительно друг друга или одновременного разрыва межатомных связей между этими плоскостями. Критические значения касательных и нормальных напряжений имеют порядок $\frac{G}{2\pi}$ и $0,1E$, предельная деформация к моменту разрушения составляет несколько процентов.

Разрушение реальных тел происходит при нагрузках, меньших критических на один-два порядка. В окрестностях дефектов структуры возникает значительная концентрация напряжений. Физическая природа концентраторов напряжений в реальных телах разнообразна. Внутренние напряжения возникают, например, в результате пластических деформаций, приводящих к скоплению дислокаций и большому искажению кристаллической решетки. Пластические деформации дают скачок тока в 10^{10} раз (по сравнению с его значениями в области упругой деформации), образование заряда высокого потенциала, который релаксирует после пластического течения. Это явление в литературе называют обычно эффектом А.В. Степанова. Еще более мощные изменения зарядового состояния диэлектрика сопутствуют его раскалыванию: плотность зарядов в момент раскалывания достигает 10^{12} электр./см², что соответствует порогу ионизации окружающего воздуха, т.е. напряженности электрического поля $\sim 10^8$ В/см. Если разрушение происходит в вакууме, то берега трещины испускают электроны довольно высоких энергий $\sim 10^5$ эВ.

Оценим величину потенциальной энергии, которая выделяется при переходе породного массива из одного квазистационарного равновесного состояния в другое, характеризующееся минимальным значением потенциальной энергии. Рассмотрев упругое тело, на поверхности которого действуют напряжения σ , и, учитывая, что при разрушении происходит излучение электромагнитных и акустических волн, то запасенная потенциальная энергия массива расходуется на излучение электромагнитных и акустических волн, получим:

$$\Delta W = \frac{3\sigma^2 \ell}{2K} + \tau_T \gamma \ell + 4\ell \mathcal{E} + \rho V^2 \varepsilon^{*2} \ell + \varepsilon \varepsilon_0 E^2 \ell, \quad (1)$$

где K – модуль всестороннего сжатия; τ_T – касательные напряжения, соответствующие на кривой деформации участку текучести; γ – интенсивность деформаций сдвигу; ℓ – длина трещины; \mathcal{E} – поверхностная энергия; ρ – плотность среды; V – скорость акустических волн в среде; ε^* – относительная деформация; u_0 – амплитуда колебаний; E – напряженность электрического поля, возникающая при разрушении горных пород; ε – диэлектрическая проницаемость среды; ε_0 – электрическая постоянная.

Если при увеличении длины трещины потенциальная энергия не будет возрастать, то произойдет рост трещин и разрушение тела, сопровождающееся излучением акустических и электромагнитных волн. Принимая во внимание, что в рассматриваемом случае сдвиговые напряжения и деформации отсутствуют, для оценки напряженного состояния получим следующее выражение:

$$\sigma = \left(\frac{2K}{3} (\rho V^2 \varepsilon^{*2} + \varepsilon \varepsilon_0 E^2 - 4\mathcal{E}) \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (2)$$

Из полученной формулы следует, что, зная акустические, электрические свойства горных пород, их плотность и поверхностную энергию, а также, измеряя в точке приема напряженность электромагнитного поля, возникающего при разрушении горных пород, и модуль всестороннего сжатия K , можно оценить действующие в массиве напряжения и прогнозировать их изменение во времени и пространстве.

Это уравнение можно переписать с учетом поправочных коэффициентов, позволяющих прогнозировать изменение напряженного состояния в пространственно-временном континууме

$$\sigma = \left(\frac{2K}{3} (\rho V^2 \varepsilon^{*2} + \varepsilon \varepsilon_0 E^2 - 4\mathcal{E}) \right)^{\frac{1}{2}} \exp \left[- \left(\alpha r + \frac{t}{\tau} \right) \right] \cos \frac{\pi}{2R_0} r, \quad (3)$$

где α – коэффициент затухания квазистационарной волны напряжений; R_0 – размеры разрушенной области; r – расстояние от разрушенной области массива; t

– текущее время; τ – время релаксации.

Таким образом, на основе энергетического подхода к изучению трещинообразования в горных породах получено уравнение, связывающее величины механических напряжений в массиве с его поверхностной энергией и энергией акустических и электромагнитных волн, возникающих при разрушении горных пород, и уравнение, позволяющее оценивать величину плотности энергии, выделяющейся при переходе массива из одного квазистационарного равновесного состояния, характеризующегося минимальным значением потенциальной энергии, в другое.

ВЫВОДЫ

1. Обоснован комплекс геофизических методов, позволяющих контролировать развитие процессов деформаций в окрестности геомеханических и геотехнических структур. В состав комплекса входят: виброакустика, электрометрия, регистрация естественного электромагнитного излучения. Показано, что наиболее информативным методом для регистрации изменений в массиве и крепи является виброакустика, а в грунтовой толще – электрометрия. Обоснован выбор вариантов применения каждого из методов в зависимости от конкретной ситуации; разработана методология геофизического мониторинга массива с учетом синергетических эффектов для повышения устойчивости подземных сооружений и безопасности их эксплуатации.

2. На основе комплексных экспериментальных исследований установлены закономерности протекания синергетических процессов в окрестности вертикальных стволов, горизонтальных тоннелей и горных выработок, установлен квазиволновой характер изменения зон дезинтеграции и концентраций напряжений в приконтурной зоне подземных сооружений, особенностью которых является снижение амплитуды и увеличение периода нарушенности с удалением от контура выработок.

3. Явление самоорганизации разрушения определяется случайными факторами на данном участке и существует независимо от наложения глобальных закономерностей распределения напряжений вокруг протяженной структуры.

4. Явление практически не зависит от типа крепи, а определяется прочностными, вязко-упругими и контактными свойствами прилегающий пород и грунта и контактными условиями, т.е. взаимодействием системы "крепь-породный массив".

5. Разрушение массива пород и грунта, снижение нагруженности на участке практически со скоростью распространения упругих волн приводит к увеличению нагрузок на соседние участки.

6. Как и вокруг горизонтальных, так и вертикальных объектов наблюдается проворот, сползание массива вокруг объекта (крепи) в сторону "слабого грузонесущего звена".

7. Данное явление самоорганизации наблюдается независимо от типа пород и грунта, но проявляется более эффективно при предельных соотношениях прочности горных пород или грунта и напряжений в массиве.

8. Структуры гидрогеологических и газовых полей отражают геомеханическую структуру породного массива, так как любое разрушение приводит к увеличению градиента изменения параметров этих полей, а, следовательно, и к активизации протекающих физических процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Об общности гипотез развязывания выбросов и их экспериментальном подтверждении / В.Т. Глушко, А.А. Яланский, А.Т. Курносов, Т.А. Паламарчук // Горные удары, методы оценки и контроля удароопасных массивов горных пород. – Фрунзе: Илим, 1979. – С. 41-47.
2. Теория, средства и методы геофизического контроля в подземных сооружениях и горных выработках / Б.М. Усаченко, А.А. Яланский, В.Н. Сергиенко, Т.А. Паламарчук // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: МГГУ, 2000. – №8. – С. 185-188.
3. Усаченко Б.М., Паламарчук Т.А., Слащева Е.А. Исследование синергетических и волновых процессов в массиве горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: МГГУ, 2000. – № 8. – С. 182-184.
4. Яланский А.А., Паламарчук Т.А., Розумный С.Н. Особенности и диагностика процессов самоорганизации породного массива в окрестности горных выработок // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: МГГУ, 2003.- № 3.- С.151-154.

УДК 550.37:622.83

С.И. Скипочка

ЭФФЕКТИВНЫЕ СПОСОБЫ ЛОКАЦИИ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ НАРУШЕНИЙ

Наведені способи визначення координат та розмірів малоамплітудних геологічних порушень механоелектричним методом.

EFFECTIVE WAYS OF A LOCATION OF GEOLOGICAL INFRINGEMENTS

It is submitted a mechanic and electric method of definition of coordinates and the sizes at the few peak geological infringements.

Используемая на этапе разведки сеть скважин позволяет выполнить только региональный прогноз геологической нарушенности месторождения, при этом малоамплитудная нарушенность выпадает из поля зрения скважинной и полевой геофизики. В то же время известно, что именно своевременное обнаружение малоамплитудных геологических нарушений тектонического и тектоно-карстового типов на стадии разработки месторождения имеет первостепенное значение как для проектирования рациональных схем добычи ископаемых, так и прогноза гео- и газодинамических явлений.

Для повышения достоверности методов локации тектонических нарушений в угольном пласте, основанных на пластовой сейсмической разведке с применением каналовых интерференционных волн, был разработан способ геофизической разведки, использующий сейсмоэлектрический эффект второго рода (эффект E), наблюдаемый во вмещающих породах угольных формаций. Способ основан на регистрации каналовой сейсмической волны, возбужденной в угольном пласте и отраженной от исследуемого тектонического нарушения, и электромагнитной волны, индуцированной сейсмоэлектрическим эффектом го-