УДК 622.831:
550.543

В.И. Ляшенко

РАЗВИТИЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ОСНОВ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ГОРНОГО МАССИВА СЛОЖНОСТРУКТУРНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ. Сообщение 2

Приведены основные научные и практические результаты исследований в области развития научно-технических основ мониторинга состояния горного массива сложноструктурных месторождений. Описан комплексный метод исследований, включающий анализ работ по оценке напряженно-деформированного состояния горного массива с использованием теорий упругости, пластичности и запредельного деформирования, шахтные экспериментальные исследования визуальными и геофизическими методами: акустической и электромагнитной эмиссии, сейсмического зондирования, ультразвукового и ударно-волнового контроля, а также теоретический анализ и обобщение результатов по стандартным методикам. Даны краткие сведения о выборе геофизических методов, средств контроля и диагностики напряженного состояния горного массива, предложен порядок определения физико-механических характеристик пород. Изложен порядок изучения сдвижений и деформаций горных пород в массиве глубинными реперами. Показано, что внедрение геомеханического мониторинга свойств и состояния массива горных пород при подземной разработке месторождений сложной структуры обеспечивает безопасность ведения горных работ на предприятиях горнорудной промышленности.
Ключевые слова: месторождения сложной структуры, подземная разработка, безопасность, геомеханический мониторинг, приборно-методическое обеспечение.

Введение

Большинство рудных месторождений Российской Федерации, Украины, Казахстана и других развитых горнодобывающих стран характеризуются крайне сложными горно-геологическими и горнотехническими условиями. Эффектив-

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 3. С. 123–141.
© 2017. В.И. Ляшенко.

ное управление геомеханическим состоянием рудовмещающего массива в сложных горно-геологических условиях может быть обеспечено геомеханическим мониторингом его напряженно-деформированного состояния (НДС). Основу такого мониторинга составляют геофизические и механические методы, совершенствование которых и адаптация к конкретным условиям месторождения весьма актуальны. Поэтому развитие научно-технических основ мониторинга состояния горного массива сложноструктурных месторождений с учетом оценки степени устойчивости обнажений, выявления закономерностей их деформирования и разрушения, увязки выемки руды и пород во времени и пространстве, определения параметров конструктивных элементов систем разработки, способов крепления и соответствующих типов крепи – важные, имеющие научное и практическое значение задачи, требующие системного решения [1–10].

Метод исследований – комплексный, включающий анализ работ по оценке напряженно-деформированного состояния горного массива с использованием теорий упругости, пластичности и запредельного деформирования, шахтные экспериментальные исследования визуальными и геофизическими методами: акустической и электромагнитной эмиссии, сейсмического зондирования, ультразвукового и ударно-волнового контроля, а также теоретический анализ и обобщение результатов измерений.

Выбор методов и средств контроля

Инструментальным методам контроля и диагностики должны предшествовать визуальные исследования, по результатам которых принимается решение о привлечении одного или (для повышения достоверности) комплекса методов горной геофизики. Основной предпосылкой геофизического контроля в горных выработках является недостаточный объем и довольно низкая достоверность данных, которые предварительно были получены при выполнении визуального осмотра, а также при проведении разведочного и контрольного бурения. При выборе методов контроля учитывают следующие факторы: характер задач, которые можно решить с помощью тех или иных методов геофизического контроля; априорные результаты по степени информативности метода; условия и возможности выполнения измерений; результаты предварительного визуального обследования; наличие соответствующих технических средств; трудовые и материальные затраты; продолжительность всего цикла работ. При выполнении диагностики состояния закрепленных

и незакрепленных участков горных выработок рекомендуется применять следующие геофизические методы: ультразвуковой, ударно-волновой (виброакустический), электрометрический и электромагнитный.

Ультразвуковой метод используется для экспресс-определения физико-механических свойств горных пород в лабораторных условиях, в том числе с помощью передвижных лабораторий, а также оценки напряженно-деформированного состояния пород и степени их трещиноватости в массиве.

Ударно-волновой метод используется для оценки состояния бетонной, железобетонной (в том числе тюбинговой), анкерной, набрызгбетонной и многослойной крепей, а также контроля скрытых заколов и расслоений в кровле и стенках выработок.

Электрометрический метод применяется для оценки напряженно-деформированного состояния, трещиноватости и увлажненности массива горных пород.

Электромагнитный метод, базирующийся на регистрации интенсивности естественного импульсного электромагнитного излучения пород, используется для оперативного выявления крупномасштабных участков повышенного трещинообразования в массиве и оценки развития деформационных процессов в системе «крепь-массив», возникающих под воздействием горного давления, а также различных технологических и горно-геологических факторов, сопровождающихся трибоэлектрическими эффектами.

Применению каждого из указанных методов предшествует определение его информативности применительно к конкретным условиям и задачам диагностики. Этот процесс включает статистическую обработку массива данных, полученных на заведомо аномальных и ненарушенных участках. Конкретный тип аппаратуры выбирается, исходя из поставленных задач и наличия серийного или единичного производства, осуществляемого в специализированных организациях, а также из числа отечественных или импортных приборов, используемых для контроля и диагностики в других областях техники. Основные критерии выбора аппаратуры сводятся к следующему: соответствие требуемым техническим характеристикам, портативность, наличие автономного источника питания, рудничное исполнение, помехоустойчивость по отношению к электромагнитным наводкам промышленной частоты. При выборе современных технических средств со встроенным программным обеспечением необходимо руководствоваться такими критериями: использование в прибо-

ре русифицированного меню; наличие доступного адаптера для связи с персональными компьютерами; минимальные требования к аппаратным возможностям и программному обеспечению для обработки данных, скопированных из памяти прибора; возможность тестирования устройства в процессе выполнения работы и автоматической блокировки работы при выявлении неисправностей, оперативного просмотра сохраненных данных.

Порядок определения физико-механических характеристик пород

Периодичность контроля физико-механических характеристик горных пород независимо от наличия данных геологических отчетов устанавливается из следующих соображений: в подготовительных выработках интервал опробования не должен превышать 50 м, со сгущением в зонах тектонических нарушений до 10 м; в очистных камерах опробование производится в каждом блоке с обязательным отбором проб рудного тела, а также пород висячего и лежачего боков; количество проб в каждой точке отбора должно быть не менее 5-ти [11–17].

Физико-механические показатели: удельный вес (g), плотность (ρ), пористость (p) и влажность (w) определяют методами, регламентированными ГОСТами. Для определения удельного веса используют пикнометрический метод с применением керосина в качестве рабочей жидкости. За конечный результат принимают среднее арифметическое по результатам трех определений на каждой пробе. Плотность определяют на образцах правильной геометрической формы в условиях естественной влажности. Взвешивание образцов производят на технических весах типа Т-1000 с точностью до 0,01 г. Объем образцов вычисляют по результатам непосредственных измерений их линейных размеров. Влажность определяют по разности весов до и после нагревания навесок в сушильном шкафу при температуре 65° С в течение 3 часов. Вычисление влажности проводят по двум навескам с каждой пробы. Взвешивание производят на аналитических весах типа ВЛА-200-М с точностью до 0,0001 г.

Образцы для определения прочностных, механических и реологических характеристик пород изготавливают на камнерезной машине с последующей шлифовкой и доводкой рабочих поверхностей на шлифовальных станках. Динамические методы основаны на измерении скоростей распространения продольных и поперечных (или поверхностных) волн и на последующем расчете динамических упругих показателей по волновым

уравнениям. При этом, если измерена только скорость продольной волны, то вычисляют модуль Юнга E (при условии, что коэффициент Пуассона ν и плотность ρ известны). В этом случае ν принимают равным средним значениям для данного типа пород, а плотность определяют гидростатическим методом.

Для одновременного определения двух упругих параметров необходимо измерить какие-либо две скорости распространения, например, продольных (в безграничной среде) V_p и поперечных V_s волн, скорости V_p и скорости поверхностных релеевских волн V_R, скорости V_p и скорости продольных волн в стержне V_D. Скорости продольных, поперечных и поверхностных волн связаны между собой соотношением $V_p > V_s > V_R$. В образцах, превышающих по размерам длину волн λ, распространяются чисто продольные и поперечные волны, скорости которых соответствуют значениям для безграничной среды и определяются выражениями [11]:

$$V_p = \sqrt{\frac{E}{\rho}\frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}}\,; \quad V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}\,. \tag{1}$$

В образцах, имеющих форму стержня, с поперечными размерами намного меньше длины волны ($d/\lambda \le 0{,}17$), скорость распространения продольных волн определяется формулой:

$$V_D = \sqrt{\frac{E}{\rho}}\,. \tag{2}$$

Скорость продольной волны в пластине со свободными границами толщиной $h < \lambda$ рассчитывают по формуле:

$$V_n = \sqrt{\frac{E}{\rho}\frac{1}{1-\nu^2}}\,. \tag{3}$$

Соотношение скоростей продольных и поперечных волн изменяется в широком интервале от 1,5 до 2 и более. Значения скоростей поверхностных релеевских V_R, продольных V_p и поперечных V_S волн связаны соотношением:

$$\left(2-\frac{V_R^2}{V_S^2}\right)^2 = 4\sqrt{\left(1-\frac{V_R^2}{V_S^2}\right)\left(1-\frac{V_R^2}{V_p^2}\right)}. \tag{4}$$

По эмпирическим данным значения скоростей V_R, и V_S связаны соотношением:

$$\frac{V_R}{V_S} = \frac{0{,}87+1{,}12\nu}{1+\nu}. \tag{5}$$

Обычно для расчетов принимают $V_R \approx 0{,}9\ V_S$. Динамические упругие параметры (модуль упругости Юнга E, модуль сдвига G, коэффициент Пуассона ν, модуль всестороннего сжатия K) определяют по средним для пробы значениям скоростей продольных и поперечных волн и измерений гидростатическим методом (или по табличным значениям для соответствующего типа пород или бетона) плотности ρ. Упругие константы рассчитывают по преобразованным формулам волновых уравнений:

$$\nu = \frac{1 - 2\left(V_s / V_p\right)^2}{2 - 2\left(V_s / V_p\right)^2} = \frac{0{,}5\left(V_p / V_s\right)^2 - 1}{\left(V_p / V_s\right)^2 - 1};$$

$$G = \rho V_s^2;\ E = 2G\,(1 - \nu); \tag{6}$$

$$E = \rho V_p^2 \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu};\ E = \rho V_n^2 (1-\nu)^2;$$

$$E = \rho V^2 D;\ K = \frac{E}{3(1-2\nu)}.$$

Скорости распространения упругих волн в образце вычисляют по формулам:

$$V_p = \frac{l}{t_p - t_з};\ V_s = \frac{l}{t_s - t_з}, \tag{7}$$

где l – длина образца; $t_р$ – время пробега упругого импульса продольной волны; t_s – время пробега сдвиговой волны; $t_з$ – время задержки датчиков.

Метод комплексного определения пределов прочности при многократном раскалывании образцов производится на дисках и пластинах толщиной 20 мм. Диаметр дисков должен быть не менее 75 мм, а размер пластин – не менее 100×100 мм. Плоскости отреза образцов должны быть параллельны, отклонение допускается не более 0,5 мм по диаметру или минимальному размеру образца, неровности на плоскостях допускаются не более 0,05 мм. Образец с нанесенной на ней квадратной сеткой со стороной квадрата 20 мм устанавливается на устройстве, которое состоит из стальных клиньев имеющих угол заточки 90° с радиусом закругления 5±1 мм и длиной лезвия, превышающего наибольший линейный размер образца, при этом лезвия клиньев совмещаются в одной из линий нанесенной сетки. При работе пресса образец раскалывают сначала на бруски, затем по поперечным линиям – на кубики полуправильной формы, фиксируя при каждом раскалывании максимальную разрушающую силу

и измеряя линии раскола с погрешностью не более 0,5 мм. Для определения предела прочности при растяжении учитывают результаты испытаний, проведенных по линии раскола длиной не менее 20 мм, отстоящей от края образца не менее чем на 10 мм.

Для испытания на сжатие используют образцы, полученные в процессе раскалывания, с линейными размерами параллельных плоскостей 20×20 мм и допускаемыми отклонениями от каждого размера не более ±2 мм, заменив раскалывающие клинья плитами. Образцы с предварительно замеренными линейными размерами параллельных плоскостей отреза помещают в

Таблица 1

Значения угла внутреннего трения, коэффициента сцепления и сопротивления породы сдвигу

$\sigma_{сж}/\sigma_р$	$\tau_{max}/\sigma_{сж}$	φ, **град**	$k/\sigma_{сж}$	$\sigma_{сж}/\sigma_р$	$\tau_{max}/\sigma_{сж}$	φ, **град**	$k/\sigma_{сж}$
1,40	0,548	5,5	0,452	7,60	1,886	37,0	0,250
1,70	0,562	6,5	0,445	7,90	1,985	37,5	0,247
2,00	0,578	9,5	0,421	8,20	2,056	38,0	0,244
2,30	0,619	11,5	0,407	8,50	2,133	38,5	0,242
2,60	0,648	13,5	0,395	8,80	2,220	39,0	0,239
2,90	0,679	15,5	0,378	9,10	2,335	39,5	0,236
3,20	0,713	17,5	0,367	9,40	2,463	40,0	0,232
3,50	0,755	19,0	0,356	9,70	2,605	40,5	0,230
3,80	0,798	20,5	0,345	10,0	2,765	41,0	0,226
4,10	0,867	22,5	0,334	13,0	3,900	44,5	0,208
4,40	0,926	24,5	0,323	16,0	4,914	47,0	0,196
4,70	0,986	25,5	0,314	19,0	6,038	50,0	0,182
5,00	1,052	27,0	0,306	22,0	6,998	50,5	0,179
5,30	1,114	28,0	0,299	25,0	7,990	51,0	0,177
5,60	1,181	29,5	0,291	28,0	9,080	52,5	0,170
5,90	1,257	30,5	0,284	31,0	9,956	53,0	0,167
6,20	1,359	32,0	0,278	34,0	11,279	54,0	0,163
6,50	1,517	33,5	0,268	37,0	12,731	55,0	0,159
6,80	1,671	35,0	0,260	40,0	13,748	55,0	0,158
7,00	1,727	35,5	0,257	43,0	14,928	56,0	0,154
7,30	1,779	36,0	0,254	46,0	16,023	56,5	0,150

центре давильной плиты пресса на одну из плоскостей отреза. Пресс приводится в работу с постоянной скоростью нагружения, сохраняя ее до разрушения образца. Предел прочности образца горной породы при раскалывании ($\sigma_р$) и сжатии ($\sigma_{сж}$) в МПа вычисляют по формуле:

$$\sigma_p = \frac{P}{S} \times 10\,; \quad \sigma_{сж} = \frac{P}{S} \times 10\,, \tag{8}$$

где P – разрушающая нагрузка при раскалывании (сжатии), кН; S – площадь поперечного сечения образца вдоль линии раскалывания, см^2.

Угол внутреннего трения (φ) и коэффициент сцепления (k) определяются путем построения паспортов прочности горных пород. Паспортом прочности горной породы является кривая огибающая максимальные круги напряжений, построенная в координатах нормальных и касательных напряжений [16]. Для определения φ и k в области нормальных напряжений от нуля до предела прочности пород при одноосном сжатии наиболее просто использовать величины пределов прочности горных пород при одноосном сжатии $\sigma_{сж}$ и одноосном растяжении $\sigma_р$, а также экспресс-определение угла внутреннего трения, коэффициента сцепления и максимального (асимптотического) сопротивления породы сдвигу (τ_{max}) при полностью закрытых трещинах на основе обработки паспортов прочности (табл. 1) [12].

Изучение сдвижений и деформаций горных пород в массиве глубинными реперами

Метод включает постановку наблюдений на земной поверхности, в горных выработках и скважинах. Для этой цели широко применяют глубинные реперы, закладываемые в скважины. Сущность метода заключается в том, что в специальные скважины, пробуренные из горной выработки или земной поверхности, закладываются на выбранных расстояниях от устьев глубинные реперы. От каждого репера к замерной станции (измерительные устройства) выводятся системы связи (нержавеющая проволока или колонны штанг), с помощью которых определяют смещение реперов, а следовательно и массива вокруг пустот, в направлении оси скважины.

Существующие технические средства предназначены в основном для условий осадочных, пластовых, угольных и сланцевых месторождений, породы которых под действием сил горного давления претерпевают значительные деформации без разру-

шения, а для рудных месторождений не удовлетворяют требуемой точности и диапазона измеряемых величин. Проведенные стендовые исследования и работы по усовершенствованию технических средств измерения смещений и деформаций по методу глубинных реперов показали, что для условий скальных месторождений конструкция измерительных устройств и связей с ними должна обеспечивать: надежность закрепления в скважине; минимальные искажения передачи смещения репера к измерительному устройству; предохранение измерительной части от возможных повреждений; необходимую точность и диапазон измерений смещения в пределах 10^{-4}—10^{-5} и деформации от 10^{-5} до 10^{-6}; возможность дистанционных автоматизированных измерений; простоту установки, демонтажа и изготовления. Таким требованиям отвечает глубинный репер, нашедший широкое применение в сложных горно-геологических условиях месторождений сложной структуры Украины.

Репер стержневого типа (А.С. СССР № 394685) применяют для неглубоких, пробуренных во все стороны из горной выработки скважин (рис. 1). Он эффективно применяется только индивидуально, так как при установке в скважине нескольких реперов происходит осевое кручение последних и захлестывание проволок связи между ними. Это в значительной степени усложняет оборудование станции глубинными реперами, снижает общую надежность их работы.

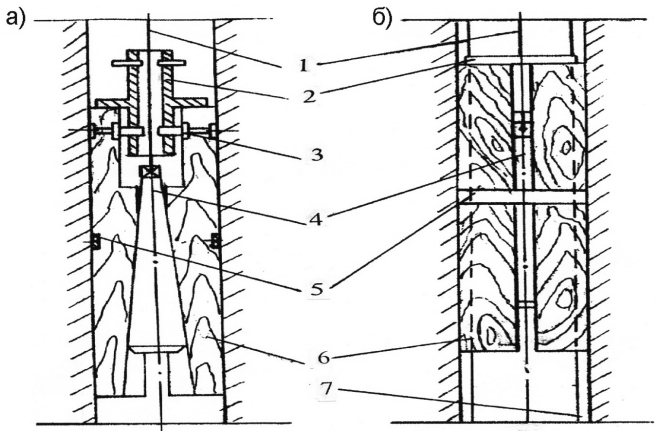

Рис. 1. Конструкции реперов для неглубоких (а) и глубоких (б) скважин: 1 – проволока связи; 2 – опорная втулка; 3 – стяжной винт с гайкой; 4 – стержень; 5 – резиновые кольца; 6 – деревянные сегменты; 7 – направляющие тяги

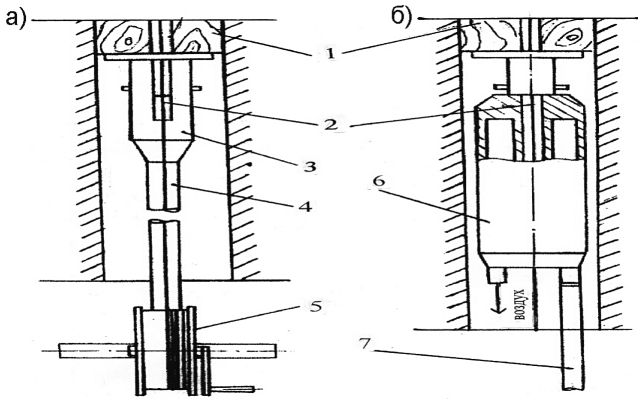

Рис. 2. Устройство для закрепления реперов с ручной лебедкой (а) и реактивной установкой (б): 1 – глубинный репер; 2 – проволока связи; 3 – установочная головка; 4 – штанга; 5 – лебедка; 6 – реактивный снаряд; 7 – воздушный резиновый шланг

Глубинный репер стержневого типа (А.С. СССР № 604999) применяют для глубоких нисходящих скважин, пробуренных из подземных горных выработок и земной поверхности (см. рис. 1, *б*). Конструкция этого репера отличается наличием направляющих тяг, размещенных в продольных пазах деревянных сегментов. Закладку репера и его закрепление в неглубоких скважинах, пробуренных во все стороны из подземной выработки, осуществляют при помощи установочной головки с ручной лебедкой или при помощи реактивной установки (рис. 2) (А.С. СССР № 827786), а в нисходящих, пробуренных из подземной выработки и земной поверхности – опускным ударником, при наличии воды в скважине – стопорным устройством (рис. 3) (А.С. СССР № 712499).

В качестве связи при постановке длительных наблюдений необходимо применять стальную нержавеющую кислотостойкую проволоку, например, 1Х18Н10Т или титановую. При применении измерительных устройств в качестве блоков с натяжением проволоки и грузом существенное значение имеет выбор натяжения проволоки (табл. 2).

Таблица 2

Характеристика груза натяжения проволоки

Диаметр, мм	0,5	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,5
Натяжение (масса), кг	3	5	8	10	12	14	16	18	19	20

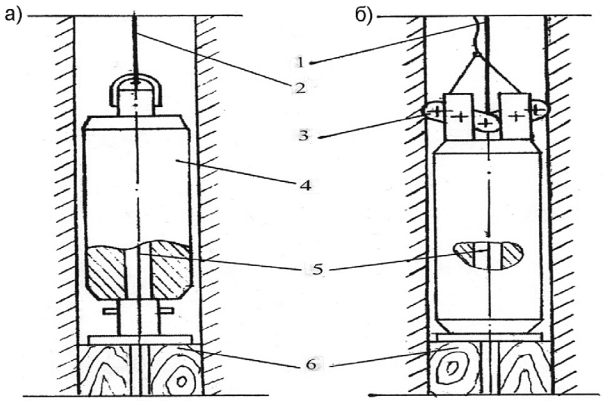

Рис. 3. Конструкция для закрепления реперов в нисходящих скважинах: опускной ударник (а); стопорное устройство (б): 1, 2 – соответственно стопорный и опускной трос; 3 – стопорные пластины; 4 – груз; 5 – проволока связи; 6 – глубинные реперы

Измерение сдвижений глубинных реперов в подземных выработках производят с помощью регистрирующих устройств БИР (рис. 4) и ТА (рис. 5), а с земной поверхности – наблюдательных станций, оборудованных блоками с постоянными грузами (рис. 6). Для неглубоких скважин (до 25–30 м) целесообразно

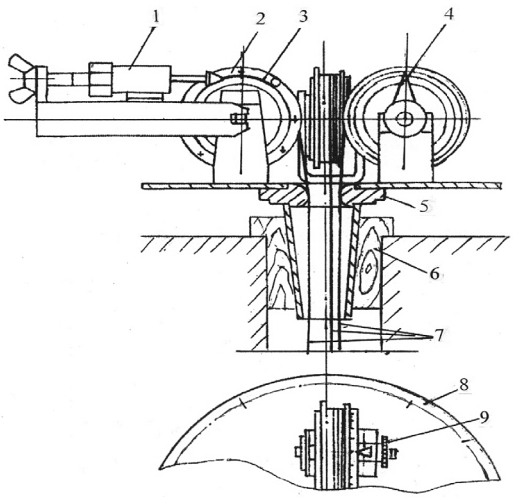

Рис. 4. Конструкция регистрирующего устройства: 1 – переносной динамометр; 2 – барабан с фрикционным устройством; 3 – тяга; 4 – указатель; 5 – основание; 6 – деревянные вкладыши; 7 – проволока связи: 8 – плата; 9 – стопорный маховик

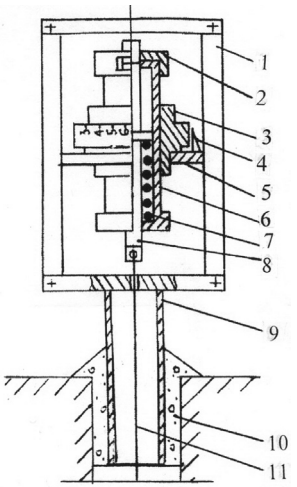

Рис. 5. Конструкция переносного микрометрического регистрирующего устройства: 1 – защитный колпак; 2 – нульорган; 3 – микрометрическая гайка; 4 – указатель; 5 – перемычка; 6 – полый цилиндр; 7 – пружина; 8 – стержень; 9 – обсадная труба; 10 – бетон; 11 – проволока

применять проволоку диаметром 0,5–1,2 мм, для средней глубины (до 100 м) – 1,2–2,0 мм, а более глубоких (свыше 100 м) – свыше 2,0 мм. Станция глубинных реперов включает одну или несколько скважин, пробуренных с поверхности или из горных

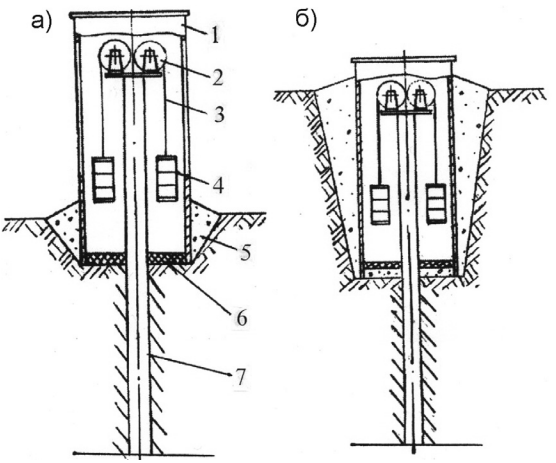

Рис. 6. Конструкция наблюдательных станций в сухом (а) и обводненном (б) грунте: 1 – защитный корпус; 2 – регистрирующее устройство; 3 – проволока связи; 4 – груз; 5 – бетон; 6 – битум; 7 – обсадная труба

выработок. При определении числа глубинных реперов и мест их закладки в скважине следует учитывать структуру и вероятную схему сдвижения пород, развитие горных работ.

Согласно «Инструкции по наблюдениям за сдвижением горных пород и земной поверхности при подземной разработке рудных месторождений», разработанной ОАО «ВНИМИ», наблюдения за сдвижением глубинных реперов следует проводить после стабилизации натяжения проволоки связи (от одной до двух недель). При опускании толщи массива пород и руд только вдоль оси скважины и без расслоений его измеренные величины равны фактическим:

$$\Delta l_1 = \Delta l_{1ф}; \quad \Delta l_2 = \Delta l_{2ф}, \tag{9}$$

где Δl_1 и Δl_2 – перемещение проволоки связи, соответствующего репера, мм; $\Delta l_{1ф}$ и $\Delta l_{2ф}$ – перемещение соответствующих реперов, установленных в разных точках массива, мм.

Расстояния между реперами в этом случае равно

$$\Delta l = \Delta l_{1изм} - \Delta l_{1изм}, \tag{10}$$

При этом: $\Delta l > 0$ – нижний слой массива опускается быстрее верхнего; $\Delta l = 0$ – все слои массива опускаются одновременно; $\Delta l < 0$ – верхний слой опускается быстрее нижнего, до начала наблюдений между ними было расслоение.

Постоянство значения удлинения проволоки связи за счет дополнительного натяжения в процессе наблюдений – гарантия того, что между реперами и точкой измерения не защемлена проволока. В случае изменения этого значения, место защемления проволоки в скважине (H_3) определяется согласно выражению

$$H_3 = H_p \cdot \Delta l_1 / \Delta l_0, \tag{11}$$

где $H_р$ – расстояние до глубинного репера; Δl_0 – удлинение проволоки в начальной серии наблюдений; Δl_1- то же, в последующих сериях наблюдений.

Значение удлинения проволоки в начальной серии наблюдений контролируется согласно выражению

$$\Delta l_0 = \Delta P H_p / ES, \tag{12}$$

где ΔP – приращение нагрузки; E – модуль упругости материала проволоки; S – площадь поперечного сечения проволоки.

Период наблюдений между их сериями на долгосрочных станциях должен быть не менее 1 раза в месяц с занесением результатов в специальный журнал (табл. 3).

Таблица 3

Результаты наблюдений за сдвижением реперов

Дата наблюдения	Место наблюдения	Наблюдательная станция	Репер 1		Репер 2		Наблюдатель
			отчет	Δl, мм	отчет	Δl, мм	
21.04.15	гор. 105 м	НС-1	5,48	2	3,64	1	С.М. Орлов

Достоинством этого метода является то, что информацию о состоянии массива можно получить на достаточно удаленном расстоянии от места, из которого пробурены скважины. Исследования точности измерений смещений глубинных реперов, проведенные специалистами ОАО «ВНИМИ», подтверждают, что средняя квадратическая погрешность измерений при глубине скважин до 15 м не превышает ±0,05 мм, а при 50 м – ±0,2 мм. Применение глубинных реперов позволяет регистрировать: сдвижение отдельных слоев и в целом толщи горных пород при проведении очистных работ; деформации горных пород, окружающих горную выработку как в зоне неупругих деформаций, так и за ее пределами, в опорной зоне и зоне разгрузки [18].

Оценка полученных результатов

По результатам исследований Государственного предприятия «УкрНИПИИпромтехнологии» (г. Желтые Воды), Государственного предприятия «Научно-исследовательский горнорудный институт» (г. Кривой Рог) и Института геотехнической механики НАН Украины им. М.С. Полякова(г. Днепропетровск), а также с учетом передового опыта применения камерных систем с закладкой на Криворожском и Запорожском железорудных комбинатах, в других бассейнах страны и за рубежом и используя аппаратурно-методические разработки для условий месторождений сложной структуры Украины составлены и утверждены: «Инструкция по обоснованию безопасных и устойчивых параметров очистных блоков на шахтах ГП «ВостГОК», а также «Инструкция по обоснованию безопасного ведения горных работ и порядка отработки рудных залежей на шахтах ГП «ВостГОК» и «Инструкция по геомеханическому обоснованию безопасной отработки запасов выше гор. – 300 м на шахте «Новоконстантиновская» [19–26].

Таким образом, использование этих документов позволяет определить физико-механические свойства горных пород и массивов; векторно-силовые характеристики системы «крепь-массив»; оценить напряженно-деформированное состояние масси-

ва горных пород с выявлением параметров аномальных зон (неупругих деформаций, опорного и геостатического давления и т.д.), состояние крепи и охранных конструкций; выполнить прогноз аномальных проявлений горного давления, в том числе обрушений пород, динамических и газодинамических явлений; выявить тектонические нарушения, карсты, водонапорные горизонты, другие структурные неоднородности массива; осуществить контроль наличия заколов в кровле и ее расслоение, возможных негативных процессов в подземной геотехнической системе для создания условий по предотвращению аварий; разработать научно-методическое обоснование по расследованию аварий с обратной связью для корректировки аппаратурной и нормативно-технической базы контроля. Внедрение геомеханического мониторинга свойств и состояния массива горных пород при подземной разработке месторождений сложной структуры повышает безопасность ведения горных работ на предприятиях горнорудной промышленности.

Выводы

1. Определены зоны влияния пустот отработанных камер на дневную поверхность для Ингульской шахты (блок 13-4, глубина 196 м и блок 10-96, глубина 184 м) и для Смолинской шахты (блок 554-3, глубина 475 м и блок 464-26, глубина 330 м). Размеры зон изменяется от 42 до 155 м, в первом случае, и от 43 до 193 м, во втором, при этом объемы пустот не оказывают влияние на дневную поверхность.

2. Установлены зоны взаимного влияния пустот при различной толщине прослойки между сближенными залежами (междукамерными целиками). На Ингульской шахте толщина прослоек исключает взаимное влияние пустот. На Смолинской шахте толщина прослойки между блоками 554-2с1 – 504-3,4; 554-2с1 – 504-6-1; 504-3-4 – 507-61 не обеспечивает устойчивого состояния обнажений.

3. Обоснована устойчивость обнажений отработанных камер по допустимому и эквивалентному пролетам. На Ингульской шахте в предельно-устойчивом состоянии находятся блоки 10-96, 3-49, 1-б-1I с коэффициентом устойчивости $K_у \approx 1{,}0$. Состояние обнажений остальных блоков устойчивое.

В проведении экспериментальных исследований принимали участие Ю.Я. Савельев, А.Х. Дудченко, А.А. Ткаченко, А.Г. Скотаренко, А.И. Подопригора (ГП «УкрНИПИИпромтехнологии),

С.И. Скипочка, А.А. Яланский, Т.А. Паламарчук, В.Н. Сергиенко (Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины) и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Борисов А. А.* Механика горных пород. – М.: Недра, 1980. – 359 с.
2. *Фисенко Г. Л.* Предельное состояние горных пород вокруг выработок. – М.: Недра, 1980. – 359 с.
3. *Глушко В. Т.*, *Ямщиков В. С.*, *Яланский А. А.* Геофизический контроль в шахтах и тоннелях. – М.: Недра, 1987. – 278 с.
4. *Скипочка С. И.* Механоэлектрические эффекты в породах и их использование в горной геофизике. – Днепропетровск: НГАУ, 2002. – 178 с.
5. *Паламарчук Т. А.*, *Кириченко В. Я.*, *Усаченко Б. М.* Элементы механосинергетики породного массива. – Днепропетровск: Лира ЛТД, 2006. – 307 с.
6. *Анциферов А. В.*, *Скіпочка С. І.*, *Яланський А. О. та ін.* Геомеханічний моніторинг підземних геотехнічних систем. – Донецьк: «Ноулідж», 2010. – 253 с.
7. *Ляшенко В. И.*, *Голик В. И.* Геомеханический мониторинг горного массива и целиков при подземной разработке урановых месторождений // Цветная металлургия. – 2003. – № 10. – С. 2–7.
8. *Ляшенко В. И.*, *Голик В. И.* Средства геомеханического мониторинга породного массива при подземной разработке рудных месторождений // Горный журнал. – 2004. – № 5. – С. 47–50.
9. *Ляшенко В. И.*, *Колоколов О. В.*, *Разумов А. Н.* Создание и внедрение природо- и ресурсосберегающих технологий подземной разработки месторождений сложной структуры // Цветная металлургия. – 2004. – № 9. – С. 7–14.
10. *Ляшенко В. И.*, *Голик В. И.* Научные основы геомеханического мониторинга горного массива при подземной разработке месторождений сложной структуры // Цветная металлургия. – 2004. – № 10. – С. 2–10.
11. *Яланский А. А.*, *Паламарчук Т. А.*, *Скипочка С. И. и др.* Временные методические указания по экспресс-определению упругих свойств горных пород ультразвуковым методом на необработанных образцах керна геологоразведочных скважин. РД. – Л.: ВНИМИ. – 1987. – 40 с.
12. *Глушко В. Т.*, *Булычев Н. С.*, *Стрельцов Е. В. и др.* Методические указания по составу механических испытаний горных пород и методам обработки горногеологических данных при разведке и вскрытии месторождений полезных ископаемых для проектирования и расчета крепи капитальных горных выработок. – Харьков: ВНИИОМШС, 1979. – 116 с.
13. *Инструкция* по безопасному ведению горных работ на рудных и нерудных месторождениях (объектах строительства подземных сооружений), склонных к горным ударам. – Л.: ВНИМИ. 1989. – 58 с.
14. *ГОСТ 21153.0-75* Породы горные. Отбор проб и общие требования к методам физических испытаний. Введен с 1976-07-01, с изм. от 1982-01-01. – М.: Изд. стандартов, 1982. – 3 с.

15. *ГОСТ 21153.2-84* Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии: Введен с 1986-07-01. – М.: Изд. стандартов, 2001. – 10 с.

16. *ГОСТ 21153.3-85* Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном растяжении: Введен с 1987-01-01. – М.: Изд. стандартов, 1986. – 14 с.

17. *Ляшенко В. И.*, *Дядечкин Н. И.* Определение параметров технологии подземной разработки урановых месторождений // Горный журнал. – 2009. – № 10. – С. 55–58.

18. *Бабак М. И.*, *Кошик Ю. И.*, *Пухальский В. Н. и др.* Добыча и переработка урановых руд в Украине / Под общ. ред. А. П. Чернова. – Киев: АДЕФ–Украина, 2001. – 238 с.

19. *Ляшенко В. И.*, *Скипочка С. И.*, *Яланский А. А. и др.* Геомеханический мониторинг массива горных пород при подземной разработке месторождений сложной структуры // Цветная металлургия. – 2011. – № 9. – С. 3–15.

20. *Ляшенко В. И.*, *Скипочка С. И.*, *Яланский А. А. и др.* Эффективное приборно-методическое обеспечение геомеханической безопасности горных работ // Черная металлургия. – 2012. – № 5. – С. 23–31.

21. *Ляшенко В. И.*, *Скипочка С. И.*, *Яланский А. А. и др.* Геомеханический мониторинг при подземной разработке месторождений сложной структуры // Известия вузов. Горный журнал. – 2012. – № 4. – С. 109–119.

22. *Ляшенко В. И.*, *Скипочка С. И.*, *Яланский А. А. и др.* Безопасности горных работ – надежное геомеханическое и приборное обеспечение // Безопасность труда в промышленности. – 2012. – № 9. – С. 68–77.

23. *Ляшенко В. И.*, *Пухальский В. Н.* Обоснование безопасных параметров камер при подземной разработке приповерхностных запасов месторождения под охраняемыми объектами // Известия вузов. Горный журнал. – 2015. – № 3 – С. 37–49.

24. *Ляшенко В. И.* Повышение сейсмической безопасности при подземной разработке приповерхностных запасов месторождения под городской застройкой // Безопасность труда в промышленности. – 2015. – № 9. – С. 38–42.

25. *Ляшенко В. И.* Развитие геомеханического мониторинга свойств и состояния массива горных пород при подземной разработке месторождений сложной структуры // Маркшейдерский вестник. – 2016. – № 1. – С. 35–43.

26. *Ляшенко В. И.*, *Пухальский В. Н.* Повышение безопасности подземной разработки приповерхностных запасов месторождений сложной структуры // Безопасность труда в промышленности. – 2016. – № 2. – С. 36–41. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Ляшенко Василий Иванович – кандидат технических наук,
старший научный сотрудник, член-корреспондент
Украинской экологической Академии наук,
начальник научно-исследовательского отдела,
ГП «УкрНИПИИпромтехнологии»,
e-mail: ipt@iptzw.dp.ua, e-mail: vi_lyashenko@mail.ru.

Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017. No. 3, pp. 123–141.

UDC 622.831:
550.543

V.I. Lyashenko

DEVELOPMENT OF SCIENTIFIC AND TECHNICAL BASIS FOR COMPLEX-STRUCTURE ROCK MASS MONITORING. REPORT 2

The main scientific and practical results of the research in the field of scientific and technical bases for monitoring the condition of the rock mass slozhnostrukturnyh fields. Describes a complex method of research, including the analysis of works on the assessment of the stress-strain state of the rock mass using the theory of elasticity, plasticity and of limiting deformation, mine experimental study visual and geophysical methods: acoustic and electromagnetic emission, seismic sensing, ultrasonic and shock-wave control, and theoretical analysis and generalization of the results according to standard procedures. Brief information is given about the choice of geophysical methods of monitoring and diagnosing the stress state of the rock mass is proposed procedure for determining the physical and mechanical properties of rocks. The paper presents the procedure for the study of displacement and deformation of rocks in deep array benchmarks. It is shown that the introduction of monitoring geomechanical properties and conditions of the rock mass at underground mining of deposits of complex structure ensures the safety of mining operations at the enterprises of the mining industry.

Key words: complex structure of deposits, underground mining, safety, geomechanical monitoring, instrumentation and methodological support.

AUTHOR

Lyashenko V.I., Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher,
Corresponding Member of Ukrainian Ecological Academy of Sciences,
Head of Department, Ukrainian Scientific-Research and Design Institute
of Industrial Technology, 52204, Zheltye Vody, Ukraine,
e-mail: ipt@iptzw.dp.ua, e-mail: vi_lyashenko@mail.ru.

REFERENCES

1. Borisov A. A. *Mekhanika gornykh porod* (Rock mechanics), Moscow, Nedra, 1980, 359 p.

2. Fisenko G. L. *Predel'noe sostoyanie gornykh porod vokrug vyrabotok* (Limit state of rock mass around underground excavations), Moscow, Nedra, 1980, 359 p.

3. Glushko V. T., Yamshchikov V. S., Yalanskiy A. A. *Geofizicheskiy kontrol' v shakhtakh i tonnelyakh* (Geophysical control in mines and tunnels), Moscow, Nedra, 1987, 278 p.

4. Skipochka S. I. *Mekhanoelektricheskie effekty v porodakh i ikh ispol'zovanie v gornoy geofizike* (Mechanoelectrical effects in rocks and mine geophysics applications), Dnepropetrovsk, NGAU, 2002, 178 p.

5. Palamarchuk T. A., Kirichenko V. Ya., Usachenko B. M. *Elementy mekhanosinergetiki porodnogo massiva* (Elements of mechanosynergetics in rock mass), Dnepropetrovsk, Lira LTD, 2006, 307 p.

6. Antsiferov A. V., Skipochka S. I., Yalans'kiy A. O. *Geomekhanichniy monitoring pidzemnikh geotekhnichnikh sistem* (Геомеханічний моніторинг підземних геотехнічних систем), Donetsk, «Noulidzh», 2010, 253 p.

7. Lyashenko V. I., Golik V. I. *Tsvetnaya metallurgiya*. 2003, no 10, pp. 2–7.

8. Lyashenko V. I., Golik V. I. *Gornyy zhurnal*. 2004, no 5, pp. 47–50.

9. Lyashenko V. I., Kolokolov O. V., Razumov A. N. *Tsvetnaya metallurgiya*. 2004, no 9, pp. 7–14.

10. Lyashenko V. I., Golik V. I. *Tsvetnaya metallurgiya*. 2004, no 10, pp. 2–10.

11. Yalanskiy A. A., Palamarchuk T. A., Skipochka S. I. *Vremennye metodicheskie ukazaniya po ekspress-opredeleniyu uprugikh svoystv gornykh porod ul'trazvukovym metodom na neobrabotannykh obraztsakh kerna geologorazvedochnykh skvazhin* (Provisional guidelines on express ultrasonic determination of elastic properties of rocks using crude exploratory drill core specimens), Leningrad, VNIMI, 1987, 40 p.

12. Glushko V. T., Bulychev N. S., Strel'tsov E. V. *Metodicheskie ukazaniya po sostavu mekhanicheskikh ispytaniy gornykh porod i metodam obrabotki gornogeologicheskikh dannykh pri razvedke i vskrytii mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh dlya proektirovaniya i rascheta krepi kapital'nykh gornykh vyrabotok* (Guidelines on the content of mechanical tests of rocks and on methods to process geological data obtained in mineral exploration and accessing for planning and design of permanent working support), Khar'kov, VNIIOMShS, 1979, 116 p.

13. *Instruktsiya po bezopasnomu vedeniyu gornykh rabot na rudnykh i nerudnykh mestorozhdeniyakh (ob"ektakh stroitel'stva podzemnykh sooruzheniy), sklonnykh k gornym udaram* (Instructions on safe mining at rockburst-hazardous metalliferous and nonmetallic deposits (underground construction objects)), Leningrad, VNIMI, 1989, 58 p.

14. *Porody gornye. Otbor prob i obshchie trebovaniya k metodam fizicheskikh ispytaniy. GOST 21153.0-75* (Rocks. Sampling and general standards of physical testing methods. State Standart 21153.0-75), Moscow, Izd. standartov, 1982, 3 p.

15. *Porody gornye. Metody opredeleniya predela prochnosti pri odnoosnom szhatii. GOST 21153.2-84* (Rocks. Methods to determine uniaxial compression strength. State Standart 21153.2-84), Moscow, Izd. standartov, 2001, 10 p.

16. *Porody gornye. Metody opredeleniya predela prochnosti pri odnoosnom rastyazhenii. GOST 21153.3-85* (Rocks. Methods to determine uniaxial tension strength. State Standart 21153.3-85), Moscow, Izd. standartov, 1986, 14 p.

17. Lyashenko V. I., Dyadechkin N. I. *Gornyy zhurnal*. 2009, no 10, pp. 55–58.

18. Babak M. I., Koshik Yu. I., Pukhal'skiy V. N. *Dobycha i pererabotka uranovykh rud v Ukraine*. Pod red. A. P. Chernova (Uranium ore mining and processing in Ukraine. Chernov A. P. (Ed.)), Kiev, ADEF–Ukraina, 2001, 238 p.

19. Lyashenko V. I., Skipochka S. I., Yalanskiy A. A. *Tsvetnaya metallurgiya*. 2011, no 9, pp. 3–15.

20. Lyashenko V. I., Skipochka S. I., Yalanskiy A. A. *Chernaya metallurgiya*. 2012, no 5, pp. 23–31.

21. Lyashenko V. I., Skipochka S. I., Yalanskiy A. A. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*. 2012, no 4, pp. 109–119.

22. Lyashenko V. I., Skipochka S. I., Yalanskiy A. A. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*. 2012, no 9, pp. 68–77.

23. Lyashenko V. I., Pukhal'skiy V. N. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*. 2015, no 3, pp. 37–49.

24. Lyashenko V. I. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*. 2015, no 9, pp. 38–42.

25. Lyashenko V. I. *Marksheyderskiy vestnik*. 2016, no 1, pp. 35–43.

26. Lyashenko V. I., Pukhal'skiy V. N. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*. 2016, no 2, pp. 36–41.