

УДК 65.01

С.С. Кубрин

КОМПЛЕКСНЫЙ СИНТЕЗИРУЮЩИЙ ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ГОРНОГО МАССИВА *

Проанализированы современные условия добычи угля в России. Определены осложняющие факторы, влияющие на условия горных работ. Предложена концепция построения геофизического мониторинга горного массива.

Ключевые слова: контроль, геофизические параметры, выемочные работы, горный массив.

По комплексу горно-геологических факторов, оказывающих влияние на технологические и технические решения при добыче угля, все шахтопласты Кузбасского бассейна и их запасы разделены на 3 типовые группы: группа 1 — пологие пласты с низкометаморфизированными углями в зоне активного водообмена; группа 2 — пологие пласты с средне — и высокометаморфизированными углями в зоне метановых газов; группа 3 — крутые и крутонаклонные пласты мощностью от 1,5 до 20 м. К первой группе относятся пласты следующих шахт: «Егозовская», «Красноярская», «Грамотеинская», «Колмогоровская», «Листвяжная», «Кыргайская», «Талдинская», «Котинская», «Талдинская-Западная №1», шахта №7, а также шахтеновостройки на Соколовском месторождении. Для шахт этой группы характерны пласты мощностью 2—5 м, слабо нарушенные (менее 5 м/га), со слабой почвой, глубина разработки менее 200 м. Осложняющими факторами при выемке таких пластов являются самовозгораемость угля и локальные притоки воды в лаву (более 5

м³/ч). Природная газоносность пластов менее 10 м³/т.с.б.м. (тонна сухой беззольной массы).

Пласты 2 группы разрабатываются большинством шахт Кузбасса (ш. им. С.М.Кирова, Полысаевская и др.). Для них характерны мощности от 1,5 до 10 м, наличие разрывных нарушений, высокая газоносность углей (до 25 м³/т.с.б.м), глубина ведения горных работ 200 — 600 м, боковые породы средней устойчивости и устойчивые (70 %), породы основной кровли легко (65 %) и трудно обрушаемые (35 %), опасность отдельных пластов по проявлению внезапных выбросов угля и газа и горных ударов, самовозгораемость угля. Шахты этой группы пластов обеспечены высокотехнологичными (60 %) и технологичными (25 %) запасами угля на срок более 15 лет. В то же время до 15 % запасов на этих шахтах является нетехнологичными — участки небольших размеров и неправильной формы, мощность пластов менее 1,5 м.

К 3 группе относятся шахты, разрабатывающие крутые и крутонаклонные пласты, для которых еще не созданы высокопроизводительные и

* Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках Государственного контракта № 16.525.12.5008

безопасные технологии добычи угля.

Высокопроизводительная работа очистных участков в условиях шахт России приурочена, главным образом, к пологим и наклонным угольным пластам. В таких горнотехнических условиях рекомендуются 6 типовых технологических схем подготовки и отработки средней мощности и мощных угольных пластов, в их числе лавы по простиранию и падению (или восстанию). При отработке мощных пластов преимущественно используется однослойная система разработки. Бесцеликовая отработка выемочных полей предусмотрена на пластах мощностью, как правило, менее 1,5 м.

Типовые схемы подготовки и отработки угольных пластов применяются: на глубинах от земной поверхности до 600 — 1200 м (до 800 м — с оставлением целиков угля, от 800 до 1200 м — бесцеликовая отработка выемочных полей с возведением искусственных полос); при газоносности пластов угля от 10 до 30 м³/т.с.б.м на пластах, преимущественно не опасных по внезапным выбросам угля и газа и горным ударам (на опасных по этим факторам пластах угля применяются схемы без оставления целиков угля); при протяженности выемочных полей (столбов) от 800 до 3000 м, длине лав от 100 до 250 м (преимущественно 180 — 250 м); в лавах с разделением на 2 части.

По состоянию на 01.01.2006 г. на пологих и наклонных пластах мощностью от 0,9 до 16 м в работе находилось 157 очистных забоев длиной от 60 до 255 м, в том числе 3 забоя с индивидуальной крепью или 1,9 %. Добыча угля из КМЗ в 2005 г. составила 94,3 % от объемов добычи из очистных забоев. В комплексно механизуемых забоях, обеспечивающих годовую нагрузку от 500 до 4098

тыс. тонн, применяли механизированные крепи, очистные комбайны, одну струговую установку, забойные конвейеры отечественного и зарубежного производства. Средние за 2005 год нагрузки были получены в случае применения импортного оборудования на шахте им. С.М. Кирова (Кузбасс) и шахте «Распадская» (Кузбасс), соответственно 5793 т/сут при мощности пласта 1,7 м и 7768 т/сут при мощности пласта 2-3 м. Высокая средняя нагрузка на лаву 7544 т/сут достигнута в случае применения отечественного очистного оборудования при мощности пласта 2,5 м на шахте «Ульяновская» (Кузбасс). Наилучшие результаты за 2008 г. достигнуты на шахтах им. С.М. Кирова и «Котинская» (4,1-4,4 млн.т).

Наибольшие возможности для удаления максимального количества газа из выработанного пространства дает применение восходящего или нисходящего прямого проветривания очистного забоя с подсвечиванием исходящей струи, что практически исключает влияние газовыделения из выработанного пространства на допустимую нагрузку на лаву по газовому фактору. Поэтому для технологических схем разработки газоносных пластов рекомендовано прямое проветривание с обособленным разбавлением метана по источникам его выделения. По такой схеме проветриваются высокопроизводительные очистные забои Кузбасса и Воркуты на пластах, не склонных к самовозгоранию.

К наиболее опасным и распространенным явлениям, происходящим в шахтах, относятся внезапные выбросы угля (породы) и газа. Внезапные выбросы происходят при ведении горных работ в забоях горных выработок и представляют собой быстро протекающее разрушение

призабойной части газоносного угольного или породного массива под воздействием горного давления и давления газа, сопровождающееся отбросом или смещением угля (породы) и повышенным газовыделением в горную выработку.

Внезапные выбросы угля и газа за последние 40 лет имели место практически во всех основных угольных месторождениях страны. В последние годы отмечается тенденция увеличения числа и мощности внезапных выбросов угля и газа на шахтах Кузнецкого и Карагандинского бассейнов, а также и газодинамических явлений переходных форм, внезапных обрушений, выдавливания, выбросов из угольных пачек, не находящихся в сечении горной выработки, из почвы при пластах большой мощности и др. Эти явления сопровождаются обильным газовыделением и угрозой загазирования горных выработок, выносом угольной мелочи, т.е. приводят к последствиям, характерным для внезапных выбросов угля и газа. На шахтах Кузбасса, Печорского и Карагандинского бассейнов только за период 1986-2005 г.г. произошло 158 газодинамических явлений, в том числе 24 внезапных выбросов угля и газа со средней интенсивностью 226 т выброшенного угля и 118 м³/т выделившегося газа, 45 внезапных выдавливания угля с повышенным газовыделением (со средней интенсивностью 25 т выброшенного угля и 76 м³/т выделившегося газа), 56 внезапных обрушений угольного массива с повышенным газовыделением (со средней интенсивностью обрушений до 44 т угля и выделившегося при этом газа до 47 м³/т) и другие менее интенсивные явления.

Проведение горных выработок по газоносным шахтопластам нередко приводит к загазированию и взрывам

газопылевоздушных смесей, иногда с катастрофическими последствиями. В ряде случаев первопричиной взрывов являются газодинамические явления (шахта «Первомайская», 1995 г. при внезапном выбросе угля и газа; шахта «Ульяновская», 2004 г. при горном ударе в форме обрушения основной кровли). Анализ большого объема накопленных в настоящее время статистических и экспериментальных данных позволяет сделать вывод о трех главных особенностях, которые следует учитывать при разработке способов прогноза и предотвращения этих опасных явлений.

Во-первых, внезапные выбросы угля и газа происходят в зоне влияния горной выработки на напряженно-деформированное состояние призабойной части массива. Размеры протяженности полостей внезапных выбросов от поверхности обнажения угольных пластов забоями вглубь массива по трассе движения выработки обычно не превышает 5 — 15 м, что по экспериментальным данным соответствует длине области предельно-напряженного состояния краевой части этих пластов впереди забоев горных выработок.

Во-вторых, внезапные выбросы практически всегда (более 95 % случаев) происходят в момент подвигания забоя горной выработки, т.е. в момент техногенного воздействия и резкого изменения напряженно-деформированного и газодинамического состояния призабойной зоны пласта. Соответственно скорости подвигания забоя горной выработки (скорость снятия бокового напряжения и образования новой свободной поверхности) и глубина захвата при выемке имеют существенное значение для формирования выбросоопасной ситуации в призабойной части массива.

В-третьих, по статистическим данным, большинство явлений внезапных выбросов привязано к местам мелкоамплитудных тектонических нарушений (утолщениям и утончениям пласта, сбросам, взбросам), т.е. к местам, где чаще всего может наблюдаться эффект задержки деформаций и возрастания концентрации напряжений, который сильно влияет на выбросоопасность пласта. Здесь так же можно отметить, что реально выбросоопасные зоны, установленные по предупредительным признакам проявления внезапных выбросов угля и газа, наблюдаются лишь на 5-20 % протяженности подготовительных выработок пройденным по выбросоопасным пластам. Это обстоятельство, по-видимому, тоже может быть связано с локальным воздействием мелкоамплитудных нарушений на напряженное и газодинамическое состояние и соответственно выбросоопасность угольных пластов.

В качестве важного экспериментально установленного факта следует выделить высокую изменчивость длины области предельного состояния пласта (расстояния от забоя до максимума напряжений) и коэффициента концентрации напряжений для одного и того же пласта по мере продвижения забоя горной выработки. Эти данные говорят о влиянии на напряженное состояние пласта не только механических свойств (прочности, модуля упругости, и др.), но также и условий деформирования (изменения мощности и строения пласта, способ управления кровлей и др.). Скачкообразный характер перераспределения напряжений (деформаций) и изменчивость длины области предельного состояния в призабойной зоне является характерной особенностью выбросоопасных и удароопасных угольных пластов.

Из экспериментальных данных следует также, что нарастание и в особенности падение давления газа в призабойной части пластов происходит довольно синхронно с аналогичными изменениями в эпюре распределения напряжений, при этом максимум давления газа обычно совпадает с максимумом напряжений, а длина зоны дегазации краевой части пласта соответствует длине зоны спада напряжений.

Следовательно, характер изменения напряженного состояния пласта определяет характер изменения газодинамических параметров угольного пласта в призабойной зоне и, в конечном счете, его выбросоопасность. Аналогичным образом можно утверждать, что напряженно-деформированное состояние призабойной зоны угольных пластов определяет характер проявления акустической эмиссии, связанной с процессами трещинообразования, деформирования и разрушения массива. Так по данным натурных наблюдений выбросоопасные зоны угольных пластов, отличающиеся повышенной сейсмоакустической активностью, характеризуются более высокой концентрацией напряжений относительно неопасных зон и более высоким градиентом роста и спада напряжений в краевой части пластов.

В связи с интенсивной отработкой угольных пластов и существенным ростом метанообильности высокопроизводительных угольных шахт, отмеченным в последние годы, необходимы новые технические решения и взаимосвязанный комплекс технологических мероприятий, направленных на:

- совершенствование схем вскрытия, подготовки и разработки метаноносных пластов угля;
- применение современных технических средств очистной выемки угля и проведения горных выработок;

- выбор рациональных научно обоснованных схем проветривания выемочных полей и участков;

- реализацию эффективных способов, схем и параметров дегазации угольных пластов и выработанных пространств;

- извлечение кондиционных по метану газовоздушных смесей и их утилизацию в максимально возможных и экономически обоснованных объемах;

- создание безопасных условий труда по горным, газовому и пылевому факторам;

- исключение взрывов метано-пылевоздушных смесей;

- контроль напряженного состояния пласта.

Шахта им. С.М. Кирова сдана в эксплуатацию в 1935 году на отработку до горизонта +30 м с проектной мощностью 1500 тыс. т угля в год. В 1963-1970 гг. была произведена реконструкция с доведением производственной мощности до 3,0 млн. тонн в год (рис. 1).

Горнотехнические условия шахты им. С.М. Кирова:

Категория шахты по метану — сверхкатегорийная.

Опасность по взрывчатости угольной пыли — опасная.

Опасность по самовозгоранию угольных пластов — не склонны к самовозгоранию.

Опасность по горным ударам — угрожаемая с глубины 150 м.

Рабочие пласты угля, их мощность и угол залегания:

- пласт «Болдыревский» — мощность 1,8-2,4м, угол залегания от 0-10°;

- пласт «Поленовский» — мощность 1,4-1,8м, угол залегания от 0-12°.

Относительная газообильность шахты — 27м³/т и абсолютная — 177,9 м³/мин.

Категория шахты по устойчивости проветривания — 2-й категории.

Количество воздуха, поступающего в шахту — Q_p=17 079 м³/мин и Q_ф=20 010 м³/мин.

Протяженность поддерживаемых горных выработок — 96 км.

Естественный водоприток в шахту — 1 600 м³/час.

Глубина отработки — 460 м.

Производственная мощность шахты по добыче угля — 3 100 тыс. тонн угля в год.

В 2012 — 2013 году горные работы на шахте им С.М. Кирова по пласту «Поленовский» будут вестись на глубинах более 150 м. В условиях опасности по горным ударам необходимо выполнять мероприятия по предотвращению опасных горно-геологических проявлений. Для обеспечения эффективности ведения очистных работ необходимо в режиме реального времени контролировать состояние горного массива. Поэтому для обеспечения контроля напряженного состояния пласта разрабатывается Автоматизированная система поддержки принятия технологических решений и комплексного синтезирующего мониторинга (АС ППТР и КСМ) для шахты им. С.М.Кирова ОАО СУЭК Кузбасс.

В работе находятся два пласта: Болдыревский и Поленовский. Длина выемочных столбов составляет 1700 — 2000 м, длина лав 180 — 240 м. На действующем горизонте +30 м шахта отнесена к сверхкатегорийной по газу метану и опасной по взрываемости угольной пыли. С глубины отработки 150 м пласты относятся к угрожаемым по горным ударам. По внезапным выбросам угля и газа пласты угрожаемые с 500 м.

Комплексный синтезирующий мониторинг основан на совместном использовании геофизических, геомеханических и газодинамических методов контроля и оценки состояния мас-

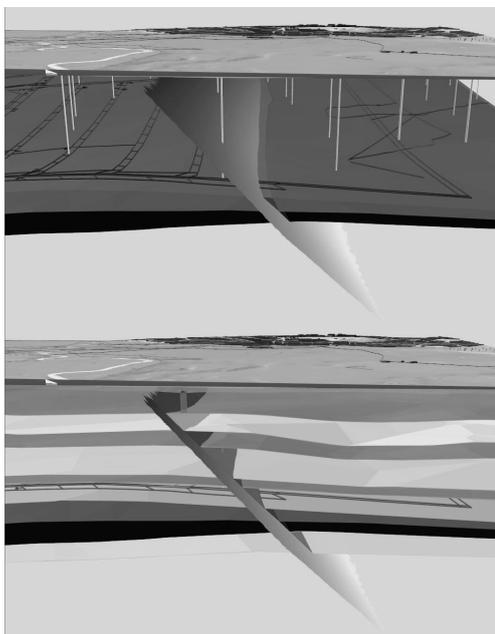


Рис. 1. Геоинформационная модель горного отвода шахты им. С.М. Кирова

сива. Отличительной особенностью данного мониторинга является его универсальность, обеспечивающая возможность прогноза степени опасности всех известных типов геодинамических явлений горном массиве, диагностику основных причин их возникновения и контроль эффективности применяемых способов их предотвращения.

В состав комплексного метода входят отдельные методы, предназначенные для установления состояния опасности геодинамических явлений, а также метод оценки потенциального состояния опасности геодинамических явлений, базирующийся на обобщенной интерпретации горно-геологических причин возникновения геодинамических явлений в разрабатываемых горных массивах.

Во внимание приняты те методы, которые при современном состоянии исследований разработаны до уровня,

обеспечивающего их промышленное применение, а горнодобывающие предприятия обеспечены или могут быть оснащены соответствующей аппаратурой для непрерывного применения этих методов.

В состав комплексного метода входят следующие методы:

а) сейсмологический метод, позволяющий оценить состояние опасности геодинамических явлений на основании регистрации разрушений горного массива в основной и непосредственной кровле горных выработок;

б) сейсмоакустический метод, позволяющий оценить повышенное состояние напряжений в элементах горного массива в зонах ведения горных работ (определение состояния опасности геодинамических явлений призабойной зоны);

в) терморadiационный, позволяющий оценить динамику напряженного состояния элементов горного массива при выполнении горнопроходческих и очистных работ;

г) тензометрический;

д) аэрогазовый.

Сущность метода сейсмической оценки является регистрация и анализ колебаний горного массива, возникающий в рудниках при разрушении горных пород. Условно колебания массива (геодинамическими явлениями) будем называть сейсмические явления с энергией выше 10 Дж и частотой колебаний до несколько десятков Гц. Физической основой применения метода для оценки состояния опасности геодинамических явлений является имеющая место связь между колебаниями и геодинамическими явлениями. Очагом колебаний называется место в горном массиве, в котором возникла сейсмическая волна. Это место одновременно является местом динамического разрушения структуры пород и высвобождением упругой энергии.

Под понятием акустической эмиссии понимается образование в породах упругих волн во время геодинамических процессов. Эти процессы могут быть результатами действия в горном массиве напряжений или нестабильных состояний, во время которых способно внезапное освобождение энергии. Такие внезапные освобождения энергии образуют в среде упругие волны, которые распространяются от очага до границ среды и могут быть зарегистрированными как сейсмоакустические импульсы. Принимается, что процессы микрорастрескивания, третинообразования и сдвига вдоль существующих трещин являются основным механизмом, ответственным за генерирование сейсмоакустической эмиссии

Спектр импульса очень широк, от низких частот, близких к сейсмическим, до ультразвуковых частот. Во время возникновения в породе упругих волн, высшие частоты подвергаются отфильтровыванию и по мере отдаления от очага в спектре импульса наблюдается относительный рост содержания составляющих низких частот. В непосредственной близости от очага можно зарегистрировать очень высокие частоты.

Изменения интенсивности микрорастрескивания горного массива и связанные с этим изменения сейсмоакустической активности коррелируются с изменениями напряжений и могут сигнализировать о моменте внезапного освобождения энергии, например разрушения или удара. Между тем, перед разрушением, очаги импульсов начинают концентрироваться или укладываться на поверхности предшествующего разрушения, что доказывает локализацию или месторасположение очага.

В основе терморadiационного бесконтактного метода геоконтроля

(ИК-радиометрия) лежит физическая модель, связанная с известным в физике твердого тела «термоупругим эффектом» — изменением температуры упругой среды при ее адиабатическом деформировании. При адиабатическом деформировании вариации температуры $\delta T(t)$ в точке среды во времени t «подобны» вариациям первого инварианта $\delta \Pi(t)$ тензора напряжений (формула Кельвина) $\delta T(t) = A_m T_0 \delta \Pi(t)$, где A_m зависит от плотности и теплофизических свойств материала, T_0 — температура до начала деформирования. Используется принцип бесконтактного измерения малых вариаций температуры, основанный на известной зависимости мощности ИК-излучения с поверхности тела от ее температуры $W(T) = \varepsilon_T \omega T^4$ ($\varepsilon_T < 1$ — коэффициент излучательной способности, ω — постоянная Стефана — Больцмана). Отмеченная малость $\delta T(t)/T_0$, позволяет линеаризовать последнее соотношение и связать вариации мощности потока $\delta W(t)$ со значениями $\delta T(t)$ пропорциональной зависимостью с коэффициентом $A_c = 4\varepsilon_T \omega T_0$. Предполагая далее пропорциональность вариаций результатов ИК-измерений $\delta U(t)$ вариациям $\delta W(t)$ с коэффициентом A_r , зависящим от параметров аппаратуры, получаем $\delta \Pi(t) = A^{-1} \delta U(t)$, где $A = A_m A_c A_r$, (1/МПа). К числу основных практических задач, для решения которых с успехом могут быть использованы результаты ИК-радиометрических измерений, относятся:

1) оперативный контроль за динамикой зон разгрузки в массиве при экспериментальных исследованиях напряженного состояния массива и

при выполнении горнопроходческих и очистных работ.

2) оперативный контроль за динамикой деформационных процессов в эксплуатируемых подземных выработках, обеспечивающий своевременное выполнение мероприятий по стабилизации работы подземного сооружения и позволяющий избежать возможные аварии.

Горные породы обладают высокой прочностью и жесткостью. При этом на определенных участках в пределах прочности структурных связей может иметь место упругая деформация, где связь между напряжениями и деформациями близка к линейной. Исходя из этого условия, определяется начальное напряженное состояние методом разгрузки. По измеренным деформациям и известному для данной горной породы модулю упругой деформации E вычисляют напряжения, действующие в данной точке массива. Для изучения НДС массива горных пород одним из способов является устройство горизонтальной или наклонной скважины с размещением в ней измерительных тензодатчиков.

Конструктивно блок «ШТЗ» (Шести элементный тензометрический зонд) выполнен в виде бетонного куба (70х70х70 мм), с параметрами прочности и жесткости соответствующих исследуемой горной породе, внутри которого расположены три тензометрических датчика, ориентированных вдоль осей Z-X-Y для трёхкомпонентной записи изменений деформаций во времени. Бетонный куб размещается в скважине, которая заполняется бетоном с аналогичными характеристиками. При изменении НДС в об-

следуемой точке массива, тензодатчики выдают электрический сигнал в виде напряжения.

Методически комплексный синтезирующий мониторинг предназначен для осуществления автоматизированного контроля и прогноза опасности геодинамических явлений при проведении подготовительных и очистных горных выработок с применением современной высокопроизводительной горной техники, обеспечивающей высокие скорости их подвигания и высокие темпы добычи полезного ископаемого.

Совместный анализ данных, полученных на основе измерений различных физических процессов, сопровождающие геодинамические явления в горных выработках, позволяет оперативно и эффективно формировать и эксплуатировать технико-технологическую информацию ведения горных работ, а так же оценивать риски, связанные с влиянием природных и техногенных процессов на технологию освоения недр месторождений твердых полезных ископаемых.

Внедрение системы комплексного синтезирующего геофизического контроля на горном предприятии, за счет комплексного мониторинга производственных процессов, позволяет добиться снижения себестоимости продукции, увеличении количества добычи полезного ископаемого и повышения безопасности ведения горных работ благодаря внедрению научно обоснованных методов и параметров мониторинга, планированию и управлению технологическими процессами предприятия. **ИИАС**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Кубрин Сергей Сергеевич — доктор технических наук, e-mail: s_kubrin@mail.ru, ИПКОН РАН.