

УДК 622.831.322

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СИСТЕМА ПРОГНОЗА ОПАСНЫХ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ



С. С. КУБРИН,
заведующий лабораторией,
проф., д-р техн. наук,
s_kubrin@mail.ru,
Институт проблем комплексного освоения
недр им. академика Н. В. Мельникова РАН,
Москва, Россия

Введение

Как известно, добыча угля подземным способом относится к весьма опасным видам производственной деятельности человека. Переход горных работ на большие глубины, усложнение горно-геологических условий, интенсификация производственного процесса добычи сопровождаются опасными динамическими явлениями, такими как выбросы угля, породы и газа, горные удары, разломы почвы с выбросом газа и т. д. [1–7].

В последние годы в угольной промышленности России были разработаны и внедрены многофункциональные системы безопасности (МФСБ) [8]. В общем случае МФСБ предназначены для обеспечения эффективной работы угледобывающих шахт при заданном уровне безопасности (допустимом уровне риска [9]). В состав МФСБ входят подсистемы аэрологической и противопожарной безопасности; взрывозащиты; безопасности технологических процессов; контроля состояния массива горных пород; спасения людей, застигнутых аварией в шахте.

Главной задачей МФСБ является заблаговременное выявление признаков предаварийной ситуации с целью недопущения ее развития в аварию путем оперативной выработки превентивных мероприятий по нейтрализации негативных факторов. На текущий момент существуют несколько методик, включенных в нормативные документы [10, 11], основанных на использовании различных физических принципов, сопровождающих техногенное изменение массива горных пород в ходе работы горного оборудования и дающих возможность оценить опасность динамического состояния призабойной зоны и самого массива в целом [12–16]. К сожалению, точность прогноза неблагоприятных событий геогазодинамической природы, возникающих в породном массиве, не превышает 75 %, что объясняется большим разнообразием горно-геологических условий, особенностью залегания и строением угольного пласта [17], физико-механическими свойствами угля и пород, режимом работы производственного участка и др.

Изложен принцип действия разработанной в ИПКОН РАН системы автоматизированного контроля газодинамического состояния породного массива, предназначенной для заблаговременного обнаружения в массиве очагов критических деформаций.

Ключевые слова: безопасность, многофункциональная система, мониторинг, прогноз, массив горных пород, газодинамические явления, оценка опасности, контроль, временная модель, шахта.

DOI: 10.17580/gzh.2017.11.18

Динамика зарождения и развития неблагоприятных горнодинамических проявлений сопровождается изменением различных физических свойств массива и возникновением сейсмоакустической эмиссии с меняющимися частотными спектрами и энергией акустических сигналов. Поэтому методы непрерывного геофизического контроля, такие как сейсмический и сейсмоакустический, весьма перспективны не только для оценки текущего состояния массива горных пород, что сейчас используется в МФСБ, но и для построения прогноза на ближайшую перспективу, особенно при их совместном использовании, когда они дополняют друг друга. Используя методы геофизического и аэрологического контроля совместно с данными, характеризующими режимы работы технологического оборудования, можно заблаговременно обнаружить в массиве динамические (сейсмические) очаги критических деформаций, места их релаксаций (горные удары, внезапные выбросы, обрушение пород кровли в выработках и т. д.) и квазистатическое движение (оседание пород, пригрузка, разгрузка и т. д.).

Для фиксации перечисленных явлений при автоматизированном контроле геомеханического состояния массива горных пород в ИПКОН РАН разработана Многофункциональная система контроля геодинамического и газодинамического состояния массива горных пород (МГСК), внедренная на шахтах «Воркутинская» и «Заполярная» ОАО «Воркутауголь» и шахте им. С. М. Кирова АО «СУЭК-Кузбасс». Данная система является частью более крупной автоматизированной системы поддержки принятия технологических решений и комплексного синтезирующего мониторинга (АС ППТР и КСМ), разработанной ИПКОН РАН и успешно испытанной в 2013 г. на очистном участке 2594 Поленовского пласта шахты им. С. М. Кирова [12].

Методы оценки и прогноза состояния массива горных пород

Комплекс технических средств МГСК построен по иерархическому принципу и включает в себя:

- устройства нижнего уровня в виде датчиков-зондов контроля сейсмической и сейсмоакустической эмиссий массива горных пород для получения информации об объекте мониторинга;

- устройства среднего уровня – регистраторы-контроллеры, предназначенные для сбора информации от датчиков, предварительной обработки информации (с сохранением динамического диапазона), преобразования в цифровой формат и передачи в линии связи пакетами в формате TCP/IP либо SHDSL через общешахтную высокоскоростную информационную магистраль, а также промежуточные усилители и медиаконвертеры, необходимые для согласования сигналов в протяженных и многоуровневых сетях передачи данных;

- устройства верхнего уровня со следующими функциями: визуализации состояния параметров и объектов управления системы с использованием графических образов и анимации, операторского интерфейса, регистрации и хранения данных, документирования и генерации отчетов, автоматической диагностики состояния технических средств всех уровней, протоколирования учетных показателей работы системы, архивирования информации в базах данных;

- линии связи, обеспечивающие обмен информацией и командами между различными устройствами и подсистемами МГСК;

- устройства электропитания.

Контроль сейсмической эмиссии осуществляется на всем шахтном поле, где ведутся горные работы. Для этого датчики-зонды измерения сейсмической эмиссии устанавливаются по внешнему контуру рабочего пространства. С целью контроля призабойной зоны в очистных и проходческих забоях используются датчики сейсмоакустической эмиссии. На очистном участке они устанавливаются на оконтуривающих участок штреках перед забоем по три единицы с расстоянием между ними и забоем, равным суточному продвижению очистных работ. При достижении места установки переднего датчика механизированным комплексом датчик извлекается из массива и устанавливается после заднего в ряду по ходу очистных работ. Такая перестановка датчиков позволяет контролировать состояние угольного пласта перед фронтом очистных работ на расстоянии (при суточном движении лавы на 20–30 м) от 60 до 90 м. На проходческом участке устанавливаются два или три датчика-зонда с отставанием от забоя на 10–20 м с расстояниями между ними в 20–30 м. По мере продвижения забоя датчики переставляются вперед в том же порядке, что и при очистных работах.

Система МГСК выявляет сигналы сейсмоакустической и сейсмической эмиссии массива, превышающей фоновое значение, на основе анализа спектра сигнала с помощью оконного (Блэкмана) преобразования Фурье и построения амплитудной огибающей преобразованием Гильберта по значениям максимальной и средней амплитудной огибающей. По выявленным сигналам оценивается динамическая опасность состояния массива горных пород с использованием трех критериев: «критического превышения», «двух точек» и «количества энергий в единицу времени» [10, 11]. По первому критерию выявляется внезапное возрастание сейсмоакустической эмиссии по сравнению с ее средним значением на

предыдущем опорном интервале (согласно инструкции [10], это превышение для проходческих забоев принимается в 10 раз, а для очистных забоев – в 30 раз). По критерию «двух точек» выявляется возрастание средней сейсмоакустической активности на двух последовательных интервалах. Для определения опасного состояния массива горных пород с помощью третьего критерия вычисляется энергия зарегистрированного импульса.

Потенциальная выбросоопасность пласта оценивается суммой энергии горного давления W_y и энергии газа, заключенного в пласте и способного к быстрому газовыделению, W_r . Величина W_d определяется по формуле:

$$W_y = \frac{\sigma_{cp}^2}{2E},$$

где σ_{cp} – среднее напряжение, МПа (принимается равным давлению налегающей толщи пород γH , где γ – объемный вес пород, H – глубина от поверхности, м); E – модуль упругости угля, МПа. Тогда с учетом скорости продвижения горных работ выбросоопасность пласта определяется по формуле $B = (W_r + 0,075W_y)I_0/l_k - 0,15$, где I_0 – сменная скорость подвигания забоя, м; l_k – длина зоны разгрузки и дегазации в призабойной части пласта, м. При неотрицательных значениях показателя B ($B \geq 0$) следует считать забой выбросоопасным.

Наибольшее влияние на оценку опасности газодинамических явлений при производстве горных работ оказывает расстояние до эпицентра явления. В соответствии с инструкцией [11], по методике регионального прогноза зон активизации геомеханических процессов с учетом зарегистрированных сейсмических и сейсмоакустических сигналов с их характеристиками (время регистрации, координаты и энергии сейсмических событий) рассчитываются границы зон опасного влияния. Радиус зоны влияния отдельного события определяется по формуле $R_{обз} = R(E_k) + 0,5A$, где $R_{обз}$ – расстояние от центра очага события с энергией E_k , на котором энергия уменьшается до безопасного уровня E_k , величина которого не способна разрушить горные породы вблизи выработки; A – погрешность определения координат события. При определении опасности от очага события учитывается, располагается ли зафиксированное явление в плоскости забоя (размер опасной зоны уменьшается пропорционально расстоянию) или вне плоскости (размер опасной зоны уменьшается пропорционально квадрату расстояния).

На основе полученных данных анализируется временной ряд каждого параметра с целью обнаружения регулярной компоненты и случайного шума. Выявляются регулярные составляющие временного ряда, а также тренд, определяющий общее изменение данных и «сезонной» составляющей (периодически повторяющаяся компонента, связанная с циклами работы очистного комбайна, рабочими или ремонтными сменами). Тренд представляет собой общую систематическую линейную или нелинейную компоненту, характеризующую измеренные или вычисленные данные. Для выявления систематического тренда данных в МГСК используется несколько методов сглаживания, качество работы которых зависит от особенностей породного массива, угольного пласта, вмещающих пород, условий их залегания и технологии горных ра-

бот. Методы сглаживания позволяют отфильтровывать шум и преобразовать данные в относительно гладкую кривую. По этим данным находятся зависимости анализируемого временного ряда. Наилучший метод определяется на основе наблюдений, проведенных на первом этапе настройки системы. В МГСК реализованы следующие методы сглаживания временных рядов:

- скользящее среднее сглаживание, в котором каждый член ряда заменяется простым или взвешенным средним соседних членов;
- медианное сглаживание, в котором используются медианы значений, попавших в скользящее окно, позволяющее добиться результатов, более устойчивых к выбросам (имеющимся внутри окна); если в данных имеются большие отклонения (выбросы), определяемые неоднородностью породного массива и угольного пласта, то сглаживание медианой позволит получить более гладкие кривые измеренных или вычисленных данных (по сравнению со скользящим средним с тем же самым окном) и вследствие этого выявить систематическую линейную или нелинейную компоненту (тренд);
- метод наименьших квадратов, взвешенных относительно расстояния, если измерение или вычисление данных было выполнено недостаточно надежно из-за сложных горно-геологических процессов, протекающих при разгрузке породного массива в ходе горных работ;
- метод отрицательного экспоненциально взвешенного сглаживания, если измерение или вычисление данных было выполнено тоже недостаточно надежно по тем же причинам, что и в предыдущем методе;
- метод бикубических сплайнов (в начальный период обработки данных).

Для прогнозирования данных строятся временные модели, использующие линейные, полиномиальные, гиперболические, логарифмические, степенные, экспоненциальные функции и их комбинации. Для оценки точности прогноза для каждой модели рассчитывается коэффициент детерминации, F -критерий Фишера, t -критерий Стьюдента и критерий Дарбина – Уотсона для того, чтобы убедиться, что случайные ошибки в модели значительно не ухудшают качество прогноза. Оптимальной на прогнозируемый интервал будет та модель, у которой коэффициент детерминации наиболее близок к единице с учетом ошибки прогноза, определенной на предыдущем интервале анализа временных рядов путем сопоставления прогнозных данных с фактически наблюдаемыми.

В процессе своего функционирования система МГСК, кроме сейсмической и сейсмоакустической эмиссий породного массива, фиксирует искусственный сигнал, инициируемый работой горного оборудования. Анализ изменения амплитудно-частотной характеристики искусственного сигнала позволяет судить об изменении свойств массива. В общем случае изменение амплитудно-частотных характеристик искусственного сигнала связано с влиянием зон аномалий, где различают комплексную и положительную аномалию. Влияние комплексной аномалии проявляется в том, что вначале максимум амплитуды колебательного процесса пада-

ет при приближении горных работ к аномальной зоне и нарастает при вхождении в нее с последующим формированием «раскачек» горных пород. По мере приближения работ к аномалии и углубления в нее частотный состав спектра сигнала перераспределяется из высокочастотной в низкочастотную область, что характеризует преобладающее влияние отрицательной аномалии с пониженными скоростями и повышенным затуханием. Влияние положительной аномалии проявляется по-другому. Вначале максимум амплитуды колебательного процесса нарастает при приближении горных работ к аномальной зоне и при вхождении в нее с последующим формированием «раскачки» пород. В процессе приближения к аномалии и углубления работ частотный состав спектра перераспределяется из низкочастотной в высокочастотную область, что характеризует влияние положительной аномалии с повышенными скоростями и пониженным затуханием.

Система МГСК оценивает критерий изменения состава амплитудно-частотных характеристик искусственного сигнала $F_{АЧХ}$:

$$F_{АЧХ} = \begin{cases} 1, & A_{КОМ} \geq n \text{ или } A_{ПОЛ} \geq m; \\ 0, & A_{КОМ} < n \text{ или } A_{ПОЛ} < m, \end{cases}$$

где $A_{КОМ}$ и $A_{ПОЛ}$ – величина влияния, соответственно, комплексной и положительной аномалии на изменение амплитудно-частотных характеристик сигнала; n и m – предельное безопасное значение допустимой величины изменения амплитудно-частотных характеристик искусственного сигнала при влиянии комплексной и положительной аномалии соответственно. Значение критерия $F_{АЧХ}$, равное единице, свидетельствует, что зона ведения горных работ входит в зону нарушения угольного пласта и вмещающих пород и что опасность динамического проявления увеличивается.

Заключение

Описанные и реализованные в МГСК методы оценки и прогноза состояния породного массива позволяют осуществлять заблаговременный прогноз неблагоприятных динамических проявлений при освоении угольных месторождений. Очевидно, что сбор данных, их анализ, комплексная оценка и прогнозирование должны осуществляться на основе автоматизированных систем. Заблаговременное выявление ранних предвестников неблагоприятных изменений, происходящих в массиве, дает возможность выработать и выполнить превентивные мероприятия по предотвращению или снижению последствий аварий, связанных с динамическими явлениями в массиве горных пород. Следовательно, использование системы МГСК, позволяющей с достаточной степенью достоверности объективно оценить и предсказать состояние породного массива с учетом пространственного расположения производственных участков, значительно снижает вероятность наступления аварий или аварийных происшествий.

Библиографический список

См. англ. блок. [\[4\]](#)

«GORNYI ZHURNAL», 2017, № 11, pp. 97–100
DOI: 10.17580/gzh.2017.11.18

Multifunction system to predict hazardous gas-dynamic phenomena in coal mines

Information about author

S. S. Kubrin¹, Head of Laboratory, Professor, Doctor of Engineering Sciences, s_kubrin@mail.ru

¹ Academician Melnikov Institute of Integrated Mineral Development – IPKON, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract

The article addresses the problems connected with the accident risk reduction in underground coal mining. The key functions of the multifunction geodynamic and gas-dynamic control of rock mass are presented. The main installation requirements for the seismic and seismo-acoustic emission control equipment in roadways and in face areas are listed. The hazard state estimation based on the data of seismo-acoustic emission in rock mass is described. Estimation criteria of dynamic phenomenon hazard are given based on the analysis of change in the seismic-acoustic emission and the amplitude-frequency response of an artificial signal initiated by the operating mining equipment. The effects of a dynamic phenomenon location on mining safety are discussed. The algorithm aimed to reveal anomalies characterizing coal damage zones and constituting potential hazard is presented.

Keywords: safety, multifunction system, monitoring, prediction, rock mass, gas-dynamic phenomena, hazard estimation, control, temporary model, mine.

References:

1. Ayruni A. T., Klebanov F. S., Smirnov O. V. Explosion hazard in coal mines. Moscow : Gornoe delo, Kimmeriyskiy tsentr, 2011. Vol. 9. Mine aerology. Book 2. 264 p.
2. Murashev V. I., Timoshenko A. M., Sukhorukov V. A., Kazantsev V. G., Ermolaev A. M. About analyses of technogenic accidents with catastrophic effects which took place at coal enterprises in Russia. *Vestnik Nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoy promyshlennosti*. 2010. No. 1. pp. 55–60.
3. Kolesnichenko E. A., Artemev V. B., Kolesnichenko I. E. Sudden outbursts of methane : theoretical basis. Moscow : Gornoe delo, 2013. Vol. 9. Mine aerology. Book 6. 231 p.
4. Kachurin N. M., Vorobev S. A., Kachurin A. N., Sarycheva I. V. Predication of methane-emission rate in development and production faces of coal mines. *Obogashchenie Rud*. 2014. No. 6. pp. 16–19.

5. Smiryakov V. V., Smiryakova V. V. Unhandy factors in statistics of accidental gas and dust explosions in coal mines in Russia. *Gornyi Zhurnal*. 2016. No. 1. pp. 30–34. DOI: 10.17580/gzh.2016.01.07
6. Brune J. F. Methane-air explosion hazard within coal mine gobbs. *Transactions of the Society for Mining, Metallurgy and Exploration*. 2013. Vol. 334. No. 1. pp. 376–390.
7. Vorobev S. A., Kachurin N. M. International experience of studies into integrated coal mining with underground method. *Gornyi Zhurnal*. 2016. No. 5. pp. 78–84. DOI: 10.17580/gzh.2016.05.11
8. Kubrin S. S. Multifunction control geodynamic and gas-dynamic state of rock mass. Evaluation and forecast the state of the rock mass. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*. 2015. Special issue No. 1. Proceedings of international scientific symposium “Miner’s Week-2015”. pp. 304–324.
9. Zakharov V. N. Assessment and management of mining risk, as a tool to improve the efficiency and safety of the mining enterprise. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*. 2013. Special issue No. 1. Proceedings of scientific symposium “Miner’s week-2013”. pp. 57–69.
10. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200029850> (accessed: 15.04.2017).
11. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200029851> (accessed: 15.04.2017).
12. Kubrin S. S., Mazanik E. V., Kigapov N. N. Automated system of support adoption of technological solutions and synthesizing complex monitoring. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*. 2014. Special issue No. 1. Proceedings of international scientific symposium “Miner’s Week-2014”. pp. 267–278.
13. Dynamic support systems helps reduce stope threats in deep mine. *Canadian Mining Journal*. 2014. Available at: <http://www.canadianminingjournal.com/features/dynamic-support-systems-helps-reduce-stope-threats-in-deep-mine/> (accessed: 15.04.2017).
14. Snelling P. E., Godin L., McKinnon S. D. The role of geologic structure and stress in triggering remote seismicity in Creighton Mine, Sudbury, Canada. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2013. Vol. 58. pp. 166–179.
15. Jones A. P., Lyle R. R., Wrixon S. Proactive safety programs provided to help protect workers at the face. *Canadian Mining Journal*. 2015. Available at: <http://www.canadianminingjournal.com/features/proactive-safety-programs-provided-to-help-protect-workers-at-the-face/> (accessed: 15.04.2017).
16. Kavanagh P. Health and safety are about prevention and response. *Canadian Mining Journal*. 2015. Available at: <http://www.canadianminingjournal.com/features/health-and-safety-are-about-prevention-and-response/> (accessed: 15.04.2017).
17. Zakharov V. N., Malinnikova O. N. The study of structural features of outburst coal seams. *Zapiski Gornogo instituta*. 2014. Vol. 210. pp. 43–52.

МЯКОТЕ ОЛЕГУ СЕМЕНОВИЧУ – 80 ЛЕТ



Исполняется 80 лет Олегу Семеновичу Мякоте – специалисту в области обогащения полезных ископаемых, доценту, кандидату технических наук.

После окончания в 1960 г. Свердловского горного института О. С. Мякота работал в институте «Уралмеханобр», где за 12 лет прошел путь от инженера до заведующего лабораторией обогащения руд редких металлов. Там же в 1969 г. защитил кандидатскую диссертацию.

В 1972 г. Олег Семенович перешел в Московский горный институт, где вел учебную и научную работу. Он был признан одним из лучших преподавателей. В научном отношении внес большой вклад в совершенствование реагентного режима при флотации руд цветных металлов.

Долгое время Олег Семенович активно сотрудничал с редакцией «Горного журнала», являлся членом его экспертного совета и рецензентом статей в области обогащения полезных ископаемых. Позднее, в 2004 г., он перешел на работу в издательство «Руда и Металлы», где до 2014 г. трудился в должности ведущего редактора «Горного журнала». И как рецензент, и как редактор, Олег Семенович всегда отличался требовательностью и принципиальным отношением к качеству материалов, предоставляемых к публикации, добивался их соответствия высокому уровню требований «Горного журнала».

Будучи высококвалифицированным специалистом в области переработки комплексного использования минерального сырья, О. С. Мякота вел в журнале соответствующий раздел. При подготовке тематических номеров журнала по НПО «РИВС» проводил активную консультационную работу с авторами и был выпускающим редактором этих номеров. Также Олег Семенович инициировал выпуск фундаментального номера «Горного журнала» «Обогащение полезных ископаемых – XXI век», в котором был дан очень подробный и актуальный анализ состояния отечественной и зарубежной обогатительной промышленности и стал, по сути своей, важной вехой в развитии «Горного журнала».

Заслуги О. С. Мякоты отмечены медалями и ведомственными знаками отличия. По решению Межотраслевого объединенного комитета по наградам он удостоен серебряной медали «За укрепление авторитета российской науки».

Поздравляем Олега Семеновича с юбилеем, желаем ему крепкого здоровья, долгих лет жизни, личного благополучия, счастья.

АО «Издательский дом «Руда и Металлы»,
редколлегия и редакция «Горного журнала»,
Горный институт НИТУ «МИСиС»,
АО «НПО РИВС», ИПКОН РАН