

К.Н. Копылов, О.В. Смирнов, А.И. Кулик

АКУСТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ МАССИВА И ПРОГНОЗ ДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ

Существующие методы прогноза динамических явлений не соответствуют современным требованиям по точности и высокой интенсивности ведения горных работ. Дальнейшее совершенствование методов должно идти по пути обеспечения непрерывности наблюдений с использованием численных значений прогностических параметров и их пороговых значений. Одним из возможных реализаций такого направления служит использование естественных и искусственных сейсмоакустических, акустических сигналов. Для условий наиболее опасных по газодинамическим явлениям шахт Донбасса разработаны и успешно применяются методы решения ряда задач прогноза, основанные на регистрации и анализе искусственного акустического сигнала, возникающего в массиве горных пород при воздействии на него горного оборудования. На базе этих разработок сформирована автоматизированная система акустического контроля состояния массива горных пород и прогноза динамических явлений САКСМ, которая включает аппаратуру регистрации, передачи сигнала и программное обеспечение по его обработке и анализу. Система обеспечивает прогноз всех видов динамических явлений и прогноз геологических нарушений впереди движущегося забоя. Система САКСМ прошла приемочные испытания и рекомендована для применения в угольных шахтах России.

Ключевые слова: прогноз, динамические явления, контроль состояния массива, акустический сигнал.

Современные рыночные отношения требуют повышения темпов ведения горных работ, увеличение глубины разработки угольных пластов и связанные с этим повышение сложности горно-геологических условий их отработки требуют нового подхода к обеспечению безопасности в части контроля состояния массива горных пород. В настоящее время прогноз динамических явлений (в том числе газодинамических) осуществляется способами, требующими бурение контрольных скважин, шпуров и определение состояния угольного пласта с использованием достаточно примитивных по современному уровню устройств [1, 2]. Произошедшие в последние годы аварии послужили причиной пересмотра нормативных документов, в том числе по прогнозу и предотвращению динамических яв-

лений, принятия более жестких мер в отношении контроля состояния горного массива в целом.

Одним из перспективных направлений совершенствования прогноза динамических явлений служат сейсмоакустические и акустические методы, которые обеспечивают непрерывные наблюдения за изменением напряженно-деформированного состояния массива горных пород.

Впервые прогноз выбросоопасности по оценке напряженно-деформированного состояния массива на основе регистрации импульсов акустической эмиссии массива разработан в 60-х годах прошлого столетия [3]. В основу прогноза положен факт повышения трещинообразования в напряженных зонах и приуроченность газодинамических явлений (ГДЯ) к последним. Основными недостатка-

ми способа прогноза являются отсутствие автоматизированного выделения импульсов и значительная его зависимость от субъективного фактора.

В 90-х годах пошлого столетия разработан способ прогноза выбросоопасности, основанный на анализе амплитудно-частотной характеристики акустического сигнала, возникающего в массиве при работе технологического оборудования [4]. Для реализации способа была разработана аппаратура АК-1, которая выполняла обработку акустического сигнала и вычисление коэффициента выбросоопасности путем деления высокочастотной составляющей сигнала к низкочастотной. Прогноз не нашел практического применения, в том числе, из-за несовершенного алгоритма обработки получаемого сигнал.

Исследованиями А.Г. Гликмана (5) была установлена закономерность формирования акустического сигнала в слоистом массиве горных пород, содержащем ослабленные межслоевые контакты (ОМК). Акустический сигнал, возникающий в массиве при его возбуждении, представляет суперпозицию собственных (резонансных) колебаний, возникающих в каждом слое пород, разделенном ОМК. При этом частота колебаний обратно пропорциональна мощности слоя, а амплитуда зависит от степени ослабления контакта. Эта зависимость позволяет по величине амплитуды резонансных колебаний судить о степени ослабления контакта, следовательно, о характере развития межслоевых деформаций и расслоении массива пород при выемке угольного пласта.

Используя установленные зависимости параметров спектра возбуждаемого акустического сигнала, в Макеевском институте по безопасности работ в горной промышленности (МакНИИ) решен ряд задач горного производства, в том числе прогноз газоди-

намических явлений, прогноз геологических нарушений впереди движущегося забоя [6, 7, 8]. Разработанные методы успешно применяются более 15 лет на наиболее опасных шахтах Донбасса. Горно-экспериментальные работы, выполненные в разные годы в шахтах Северного, Южного Кузбасса, в бокситовых рудниках Северного Урала показали возможность применения разработанных методов для прогноза не только выбросоопасных зон, но и прогноза опасности горных ударов.

Разработанные методы основаны на результатах исследований, выполненных в 60-х годах прошлого столетия В.И. Бобровым и Р.М. Кричевским, в результате которых было установлено, что выбросу угля и газа обязательно предшествует задержка деформаций в углевмещающих породах [9]. Задержка деформаций приводит к зависанию пород кровли, повышению напряженного состояния массива и накоплению потенциальной энергии, которая служит источником внезапных выбросов угля и газа. Поскольку источником горных ударов также служит повышение напряжений и накопленная потенциальная энергия, оказалось возможным использовать эти закономерности для выявления ситуаций, приводящих к горным ударам. Таким образом, задержка деформаций и накопление потенциальной энергии в условиях газоносного угольного пласта с пониженной прочностью приводит к формированию потенциально опасной по выбросам угля и газа зоне, а при высокой прочности угля и вмещающих пород – к потенциальной опасности горного удара.

Для контроля напряженного состояния и развития деформаций используются четыре параметра спектра акустического сигнала: низко- и высокочастотные составляющие спект-

ра, нижние границы частот при двух уровнях осреднения спектра. Для иллюстрации изменения напряженно-деформированного состояния массива горных пород используется коэффициент относительных напряжений, равный отношению высокочастотной составляющей спектра к низкочастотной.

Прогноз динамических явлений осуществляется путем сравнения текущих значений прогностических параметров спектра с их пороговым значением, которое устанавливается на заведомо неопасном участке. Пороговые значения автоматически регулярно контролируются и при необходимости корректируются по мере подвигания забоя. Источником акустического сигнала служит воздействие горного оборудования на забой очистной или подготовительной выработки. Обработка акустического сигнала выполняется непрерывно на протяжении всего цикла выемки угля, по результирующему среднему спектру акустического сигнала вычисляются прогностические параметры.

Руководство ОАО «Сибирской угольной энергетической компании» постоянно ищет новые методы и средства повышения безопасности горных работ, приняло решение использовать накопленный опыт, из существующих методов сформирована автоматизированная «Система акустического контроля состояния массива горных пород и прогноза динамических явлений САКСМ».

Базисные принципы системы:

1. Наиболее опасная по проявлению всех видов динамических явлений – призабойная часть массива горных пород, динамические явления, как правило, происходят при воздействии на забой горного оборудования и в момент нахождения в нем людей.

2. Акустический сигнал, возникающий при воздействии на массив горного оборудования, содержит ин-

формацию о его напряженно-деформированном состоянии.

3. Регулярное развитие деформаций при выемке угля обеспечивает возвратно-поступательное движение максимума опорного давления впереди забоя и разгружает призабойную часть пласта, этот процесс в спектре акустического сигнала отражается перераспределением амплитуд его максимумов.

4. Задержка деформаций приводит к образованию зон повышенного горного давления и накоплению в них потенциальной энергии, что является причиной динамических явлений (горные удары, выбросы угля и газа и др.). Задержка деформации отражается в спектре акустического сигнала уменьшением амплитуд низкой частоты и увеличением высокой.

5. Прогноз осуществляется путем сопоставления текущих параметров акустического сигнала с эталонными, установленными на неопасном участке выработки или на соседних выработках эксплуатируемого пласта.

Система САКСМ:

- прогнозирует потенциально опасные участки по выбросам угля и газа, горным ударам, динамическим разрушением пород почвы выработки с интенсивным газовыделением при наличии газоносного пласта-спутника, внезапным выдавливаниям угля;

- прогнозирует геологические нарушения, представляющие опасность по динамическим явлениям, впереди движущегося забоя;

- осуществляет оперативное управление процессом гидрорыхления угольного пласта;

- контролирует безопасность и эффективность бурения опережающих разгрузочных скважин;

- определяет параметры напряженно-деформированного состояния призабойной части массива по результатам бурения контрольных скважин;

- выдает сообщение об ухудшении состояния по динамическим явлениям в забое, о повышенном горном давлении;

- контролирует технологические режимы воздействия горного оборудования на забой.

С целью дальнейшего развития системы планируется расширение решаемых задач за счет: контроля качества установки анкерной крепи, оценки устойчивости выработок, прогноза состояния пород кровли, прогноза посадок основной кровли и сдвижения вышележащих пород на выемочных участках, обнаружения участков повышенной фильтрации целиков между выработками. Перспективное развитие системы должно происходить в интеграции с создаваемой многофункциональной системой безопасности (МФСБ).

Система САКСМ включает:

- аппаратуру регистрации и передачи акустического сигнала АРАС;
- программное обеспечение АКМП РИВАС;
- персональный компьютер.

Комплект аппаратуры состоит из подземной части, включающей геофон и переговорное устройство, и наземной части, преобразующей, усиливающей акустический сигнал и передающей его в компьютер для обработки. Наземное устройство осуществляет искробезопасное электропитание подземной части аппаратуры, обеспечивая ее независимость от шахтного энергоснабжения.

Программное обеспечение в автоматическом режиме выполняет обработку акустического сигнала, вычисление прогностических параметров, сравнение их с пороговыми значениями и выдает заключение о состоянии массива горных пород, прогноз всех видов динамических явлений и оценку эффективности выполненных мер их предотвращения. Результаты об-

работки сохраняются в базе данных и могут быть использованы для ретроспективного анализа и перспективного планирования. Осуществляется непрерывная запись всех акустических сигналов, поступающих из забоя, и сохранение их в течение 72 часов, что позволяет использовать их при контроле технологических процессов и при расследовании аварий и инцидентов.

Испытания и адаптация системы САКСМ проведены в одном очистном забое – лаве 2594 и четырех подготовительных выработках пласта Поленовский и в одном подготовительном забое пласта Болдыревский шахты «им. С.М. Кирова» ОАО «СУЭК-Кузбасс».

В очистном забое выполнен прогноз неизвестного геологического нарушения, в конвейерной печи 2457 параметры прогноза геологических нарушений аномальными значениями отразили приближение забоя к Восточно-Камышанскому взбросу, в газодренажном штреке 2503 переход зоны повышенного горного давления от остановленного забоя лавы на пласте Болдыревский сопровождался повышенными в 1,5 раза значениями коэффициента относительных напряжений.

Дополнительно работоспособность и эффективность прогностических параметров подтверждена результатами акустических зондирований по 22 объектам, содержащих зоны ПГД и геологические нарушения, ранее вскрытые горными выработками. В результате акустических зондирований, при котором массив горных пород возбуждается ударным способом, обработке и анализу результирующий спектр сигнала подвергается по алгоритму системы САКСМ.

В качестве примера на рис. 1 приведено распределение значений коэффициента относительных напряжений на участке зоны ПГД в вентиляции

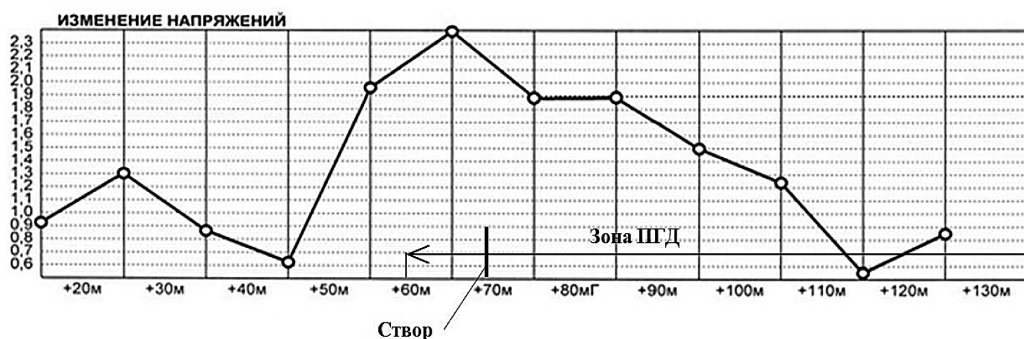


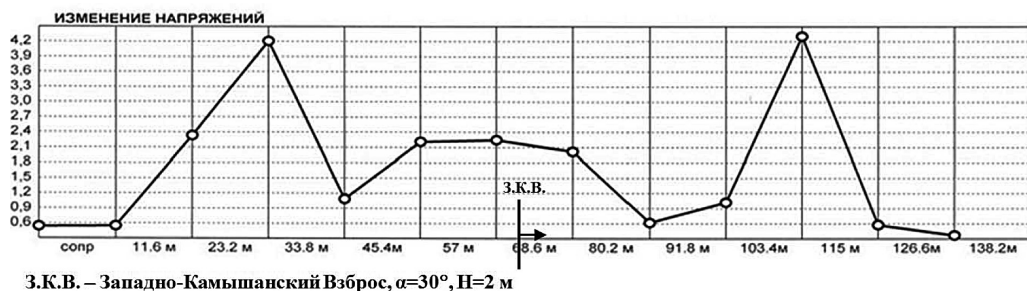
Рис. 1. Значения коэффициента относительных напряжений в зоне повышенного горного давления в вентиляционной печи 2596 шахты им. С.М. Кирова

онной печи 2596. Зона ПГД сформирована остановленной лавой на угольном пласте Болдыревский. Вход в зону ПГД по пласту Поленовский со стороны выработанного пространства на Болдыревском пласте отмечен интенсивным ростом коэффициента относительных напряжений от 0,6 до 2,4, при этом дальность развития деформаций уменьшается при приближении к границе зоны, а в пределах зоны ослабленные контакты зафиксированы на расстоянии до 12–15 м от угольного пласта.

Прогностические параметры акустического сигнала зоны ПГД отмечают пониженными значениями в 1,97 раза низкочастотной составляющей, увеличением в 1,47 раз высокочастотной составляющей, ростом в 3,4–4,1 раз частотных параметров.

На рис. 2 приведено распределение значений коэффициента относительных напряжений по центральному магистральному конвейерному штреку 2503, проведенному по угольному пласту Поленовский и пересекающему Западно-Камышанский взброс со смещением пород на 2–5 м и углом падения сместителя 300. Абсолютно аналогичное распределение коэффициента относительных напряжений получено по параллельному центральному магистральному путевому штреку 2503. Зону повышенных напряжений, расположенную вблизи плоскости смещения пород, обрамляют интенсивные локальные аномалии значений коэффициента относительных напряжений.

Прогностические параметры акустического сигнала в пределах наруше-



З.К.В. – Западно-Камышанский Взброс, $\alpha=30^\circ$, $H=2$ м

Рис. 2. Значения коэффициента относительных напряжений по центральному магистральному конвейерному штреку 2503 в месте пересечения Западно-Камышанского взброса

ния изменяются следующим образом: в висячем крыле низкочастотная составляющая уменьшается в 1,2 раза, высокочастотная в 1,5 раза увеличивается, частотные параметры от минимальных 100–150 Гц увеличиваются до 350–450 Гц в висячем крыле надвига.

Полученные данные свидетельствуют не только об эффективности использования прогностических параметров искусственного акустического сигнала при прогнозе геологических нарушений, но и об объективном отражении в них состояния массива горных пород.

Система САКСМ обладает следующими преимуществами:

- исключено влияние субъективного фактора;
- обеспечен прогноз основных видов динамических явлений происходящих в горном массиве и геологических нарушений впереди движущегося забоя, контроль состояния массива;
- получена интегральная оценка состояния призабойной части с конкретной плановой и временной привязкой результатов;

- контроль эффективности мер предотвращения ДЯ в процессе выполнения этих мероприятий;

- реализация способов прогноза ДЯ осуществляется без прерывания основных технологических процессов;

- выполнен объективный контроль ведения технологических процессов в забое;

- существенно сокращены финансовые затраты, численность рабочих, занятых на подземных работах.

Выводы

Система САКСМ отвечает современным требованиям в части непрерывности наблюдений, использования численных значений комплекса прогностических параметров и их пороговых значений, автоматизированного сбора акустической информации, ее обработки и принятия решений. Система выдержала приемочные испытания и рекомендована для контроля состояния массива горных пород, прогноза всех видов динамических явлений и контроля эффективности мер их предотвращения на угольных шахтах России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инструкция по безопасному ведению горных работ на шахтах, разрабатывающих угольные пласты, склонные к горным ударам РД 05-328-99.

2. Инструкция по безопасному ведению горных работ на пластах, опасных по внезапным выбросам угля (породы) и газа РД 05-350-00.

3. Анциферов М.С., Анциферова Н.Г., Коган Я.Я. Сейсмоакустические исследования и проблема прогноза динамических явлений. – М.: Наука, 1971. – 134 с.

4. Мирер С.В., Хмара О.И., Масленников Е.В. О контроле выбросоопасности забоев по спектральным характеристикам акустических сигналов / Вопросы предотвращения внезапных выбросов. Научн. сообщ. ИГД им. А.А. Скочинского. – 1987. – С. 52–61.

5. Гликман А.Г. Поля упругих колебаний в горных породах. – Л., 1984. – Деп. в ОЦНТИ ВИЭМС 10.04.85 № 188 мг – Деп., 63 с.

6. Лунев С.Г., Колчин Г.И. Акустический контроль выбросоопасности в очистном забое / Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах. Сб. науч. тр., Макеевка: МакНИИ. – 2004. – С. 97–107.

7. Бобров А.И., Агафонов А.В., Колчин Г.И. Контроль динамических процессов в призабойной части горного массива / Проблемы геодинамической безопасности. II международное рабочее совещание. 24–27 июня 1997. – СПб.: ВНИМИ, 1997. – С. 142–145.

8. Брюханов А.М., Агафонов А.В., Рубинский А.А., Колчин Г.И. Методы и средства прогноза и предотвращения газодинамических явлений в угольных шахтах. Расследование и предотвращение аварий на угольных шахтах. Т. 3. – Д.: Вебер, 2007. – 14 с.

9. Бобров И.В., Кричевский Р.М. Борьба с внезапными выбросами угля и газа. – Киев: Техніка, 1964. – 328 с. **ГИАС**

Копылов Константин Николаевич – и.о. технического директора ОАО «СУЭК»,
e-mail: KopylovKN@suek.ru,

Смирнов Олег Владимирович – кандидат технических наук, начальник Управления
аэрологической безопасности предприятий «СУЭК», e-mail: SmirnovOV@suek.ru,

Кулик Алексей Иванович – главный технолог по ГДЯ, Управления аэрологической
безопасности предприятий ОАО «СУЭК», e-mail: KulikAI@suek.ru.

UDC 622.831

ACOUSTIC MONITORING OF THE CONDITION OF ROCK MASS AND FORECAST OF DYNAMIC PHENOMENA

Kopylov K.N., Acting Technical Director OJSC «SUEK», Russia, e-mail: KopylovKN@suek.ru,

Smirnov O.V., Candidate of Technical Sciences,

Head of Aerologic Safety Department OJSC «SUEK», Russia, e-mail: SmirnovOV@suek.ru,

Kulik A.I., Chief Technologist on the Gasdynamic Phenomena Aerologic Safety
Department OJSC «SUEK», Russia, e-mail: KulikAI@suek.ru.

The existing methods of forecasting dynamic phenomena do not meet the modern requirements for accuracy and high intensity of mining operations. Further improvement of the methods should be aimed at ensuring continuous monitoring by using numerical values of prognostic parameters and their threshold values. One of the potential implementations of such approach is utilization of natural and artificial seismoacoustic and acoustic signals. For the mines of Donbass, which are most hazardous in terms of the gas-dynamic phenomena, the methods for solving a number of forecasting tasks based on registration and analysis of the artificial acoustic signal originating in rock mass under the influence of mining equipment have been successfully applied. Based on these advances an automated system has been developed for acoustic monitoring of the condition of the rock mass and forecasting of the dynamic phenomena SAKSM, which includes equipment for recording and transmitting the signal and software for processing and analyzing the signal. The system provides forecasting of all types of dynamic phenomena and geological faults ahead of a moving face. The SAKSM system has undergone acceptance testing and is recommended for utilization in coal mines in Russia.

Key words: forecast, dynamic phenomena, monitoring of the condition of rock mass, acoustic signal.

REFERENCES

1. *Instruktsiya po bezopasnomu vedeniyu gornykh rabot na shakhtakh, razrabatyvayushchikh ugol'nye plasty, sklonnye k gornym udaram RD 05-328-99* (Safety rules for rockburst-hazardous coal mining, RD 05-328-99).
2. *Instruktsiya po bezopasnomu vedeniyu gornykh rabot na plastakh, opasnykh po vnezapnym vybrosam ugl'ya (porody) i gaza RD 05-350-00* (Safety rules for coal (rock) and gas outburst-hazardous coal mining, RD 05-350-00).
3. Antsiferov M.S., Antsiferova N.G., Kogan Ya.Ya. *Seismoakusticheskie issledovaniya i problema prognoza dinamicheskikh yavlenii* (Acoustic measurements and problem of forecasting seismic events), Moscow, Nauka, 1971, 134 p.
4. Mirer S.V., Khmara O.I., Maslenshchikov E.V. *Voprosy predotvrashcheniya vnezapnykh vybrosov. Nauchnye soobshcheniya IGD im. A.A. Skochinskogo* (Outburst prevention issues. Skochinsky Institute of Mining Transactions), 1987, pp. 52–61.
5. Glikman A.G. *Polya uprugikh kolebaniy v gornykh porodakh* (Elastic vibration fields in rocks), Lenin-grad, 1984.
6. Lunev S.G., Kolchin G.I. *Sposoby i sredstva sozdaniya bezopasnykh i zdorovykh uslovii truda v ugol'nykh shakhtakh. Sbornik nauchnykh trudov* (Ways and means for safe and healthy working conditions in coal mines. Collection of scientific papers), Makeevka, MakNII, 2004, pp. 97–107.
7. Bobrov A.I., Agafonov A.V., Kolchin G.I. *Problemy geodinamicheskoi bezopasnosti. II mezhdunarodnoe rabochee soveshchanie. 24–27 iyunya 1997* (Problems of geodynamic safety. II International Working Conference. 24–27 June 1997), Saint-Petersburg, VNIMI, 1997, pp. 142–145.
8. Bryukhanov A.M., Agafonov A.V., Rubinskii A.A., Kolchin G.I. *Metody i sredstva prognoza i predotvrashcheniya gazodinamicheskikh yavlenii v ugol'nykh shakhtakh. Rassledovanie i predotvrashchenie avarii na ugol'nykh shakhtakh, t. 3* (Methods and means of predicting and preventing gas dynamic events in coal mines. Investigation and prevention of accidents in coal mines, vol. 3), Veber, 2007, 14 p.
9. Bobrov I.V., Krichevskii R.M. *Bor'ba s vnezapnymi vybrosami ugl'ya i gaza* (Combating coal and gas outbursts), Kiev, Tekhnika, 1964, 328 p.