

I. ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ И ГЕОМЕХАНИКА

I. INDUSTRIAL SAFETY AND GEOMECHANICS



■ **А.В. Шадрин // A.V. Shadrin**
avsh-357@mail.ru

д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геофизических исследований горного массива Института угля ФГБНУ ФИЦ УУХ СО РАН, Россия, 650065, г. Кемерово, Ленинградский проспект, 10
Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher of the Laboratory of Geophysical Research of the Rock Massif of the Institute of Coal of the FGBNU FIT UUH SB RAS, 10, Leningrad Avenue, Kemerovo, 650065, Russia



■ **А.С. Телгуз // A.S. Teleguz**
alexanderteleuz@rambler.ru

ведущий инженер лаборатории геофизических исследований горного массива Института угля ФГБНУ ФИЦ УУХ СО РАН, Россия, 650065, г. Кемерово, Ленинградский проспект, 10
Leading engineer of the Laboratory of Geophysical Research of the Massif of the Institute of Coal of the FGBNU FIT UUH SB RAS, 10, Leningrad Avenue, Kemerovo, 650065, Russia

УДК 622.831.31

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПРИ ПРОГНОЗЕ И ПРЕДОТВРАЩЕНИИ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ И КРУПНОПЛОЩАДНЫХ ОБРУШЕНИЙ КРОВЛИ В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ

PROSPECTS OF APPLICATION OF ACOUSTIC METHODS FOR THE PREDICTION AND PREVENTION OF GAS DYNAMIC PHENOMENA AND LARGE-ARISING ROOF CRANES IN COAL MININGS

Рассмотрены возможности применения метода акустической эмиссии для контроля процесса развития трещин при гидрообработке углепородного массива с целью снижения его выбросо- и удароопасности, а также недопущения крупноплощадных обрушений кровли. Установлено, что длина растущей трещины гидроразрыва, качественно оценивающая ее площадь, связана с числом импульсов АЭ экспоненциальной зависимостью. Обоснована временная зависимость активности АЭ при нагнетании жидкости с постоянным темпом, которая за исключением небольшого начального участка имеет характер монотонно убывающей функции. Установлено, что в первом приближении оптимальный темп нагнетания обратно пропорционален закачанному в пласт объему жидкости до момента ее прорыва в ближайшую выработку.

Показана перспективность применения спектрально-акустического метода для оценки напряженного состояния обработанной зоны массива, поскольку измеряемое этим методом отношение высокочастотной и низкочастотной частей спектра шумов работающего горного оборудования зависит от средних напряжений, действующих в контролируемой области горного массива. Обсуждены направления исследований, которые позволят доработать указанные акустические методы до практического использования.

The possibilities of applying the acoustic emission method for controlling the development of cracks in the hydroprocessing of a coal-bearing massif with the aim of reducing its ejection and impact hazard, as well as preventing large-scale roof collapse, are considered. It is established that the length of the growing fracture fracture, qualitatively estimating its area, is related to the number of AE pulses by an exponential dependence. Reasonable time dependence of the activity of AE at a liquid discharge with a constant rate, which except for a small initial portion of the character has a monotonically decreasing function. It is established that, in the first approximation, the optimal injection rate is inversely proportional to the volume of liquid pumped into the reservoir until it breaks into the nearest production.

The perspectivity of using the spectral-acoustic method for estimating the stressed state of the treated area of the array is shown, since the ratio of the high-frequency and low-frequency parts of the noise spectrum of the working mining equipment measured by this method depends on the average stresses acting in the controlled area of the mountain massif. The areas of research that will allow us to refine these acoustic methods before practical use are discussed.

Ключевые слова: ВЫБРОСОУДАРООПАСНОСТЬ, ГИДРООБРАБОТКА ТРУДНООБРУШАЕМОЙ КРОВЛИ И УГОЛЬНОГО ПЛАСТА, МЕТОДЫ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ И СПЕКТРАЛЬНО-АКУСТИЧЕСКИЙ

Key words: EMERGENCY RESISTANCE, HYDRAULIC PROCESSING OF A DIFFICULT ROOF AND COAL-LAYER, METHODS OF ACOUSTIC EMISSION AND SPECTRO-ACOUSTIC

Проведение горных выработок по пластам, опасным по динамическим (ДЯ) и газодинамическим явлениям (ГДЯ), а также в сложных горно-геологических условиях, требует выполнения методов прогноза указанных явлений и применения специальных способов обработки призабойного пространства, включающего угольный пласт и вмещающие породы. Эти способы должны обеспечивать безопасность при всех возможных формах проявления горного давления и внутривластового давления газа. К специальным способам обработки призабойного пространства относятся, в частности, разупрочнение труднообрушаемой кровли путем направленного гидроразрыва и профилактическая гидрообработка угольного пласта [1-4].

Труднообрушаемые кровли опасны площадным зависанием, которое может привести к резкому обрушению. Для недопущения этого и применяют метод направленного гидроразрыва основной кровли [1-2].

Гидрообработка применяется также для повышения газопроницаемости угольного пласта. С этой целью жидкость подается в скважины, пробуренные по углю, в режиме гидрорасчленения, при котором в угле создается сеть трещин, повышающая газопроницаемость и газоотдачу пласта [3]. Для локального повышения газопроницаемости и разгрузки призабойного пространства применяется также нагнетание жидкости в шпур в режиме гидроотжима [5].

Еще одно направление использования гидрообработки - увлажнение угля, поскольку установлено, что при его влажности свыше 6% внезапные выбросы никогда не происходили [6]. Происходит это потому, что при такой влажности газ блокируется в микротрещинах и порах и не выделяется в более крупные трещины в свободном состоянии. Поэтому внутривластовое давление газа не возрастает. Одновременно уголь становится более пластичным, вследствие чего зона опорного давления отодвигается в глубину массива, снижая опасность проявления динамических явлений.

Увлажнение угля осуществляется в одном из двух режимов: низконапорном увлажнении или гидрорыхлении. Низконапорное увлажнение осуществляется на пластах с высокой водопроницаемостью. В этом режиме дополнительные

трещины нагнетаемой жидкостью не создаются, а жидкость распространяется по существующим природным трещинам, из них – в микротрещины и поры, равномерно увлажняя уголь.

Гидрорыхление проводится на пластах с меньшей водопроницаемостью, чем в предыдущем случае. Жидкость в этом режиме создает дополнительную сеть трещин, из возросшей поверхности которых уголь увлажняется быстрее, чем в режиме низконапорного увлажнения.

Из сказанного следует, что все упомянутые способы гидрообработки кровли и угольного пласта характеризуются определенной интенсивностью развития (роста) трещин либо отсутствием их развития (при низконапорном увлажнении). Поскольку трещины развиваются скачкообразно, под интенсивностью развития трещин принято понимать число «скачков» растущих трещин в единицу времени [7]. Однако механизма контроля роста трещин при гидрообработке углепородного массива в шахтных условиях нет, так как технологией всех известных способов гидрообработки предусматривается только регистрация давления и скорости (темпа) нагнетания жидкости. Между тем растущая трещина является источником акустической эмиссии (АЭ), регистрация которой позволяет фиксировать как факт скачкообразного роста трещин, так и интенсивность этого процесса во времени [7].

Таким образом, контролируя акустическую эмиссию в процессе гидрообработки можно существенно повысить ее качество путем обеспечения запланированного режима нагнетания жидкости в угольный пласт или в труднообрушаемую кровлю. Однако для этого необходимо вначале установить функциональную связь между параметрами акустической эмиссии и гидрообработки, а затем определить оптимальные параметры акустической эмиссии для осуществления требуемого способа гидрообработки и разработать методику осуществления каждого из этих способов с управлением параметрами нагнетания жидкости, основываясь на акустоэмиссионной реакции пласта на процесс нагнетания жидкости. Для разработки такой методики необходимо предусмотреть оборудование (стационарное и/или переносное) для осуществления регистрации АЭ в условиях акустических помех, генерируемых работающим горным обо-

рудованием, находящимся в окрестности участка массива, подвергаемого гидрообработке.

При аналитическом нахождении функциональной связи между параметрами акустической эмиссии и гидрообработки установлено, что поведение акустической эмиссии определяется в значительной мере рабочей характеристикой насосной установки. Так например, при разупрочнении кровли пласта используют насосы типа T , предназначенные для питания механизированной крепи водомасляной эмульсией. Эти насосы имеют жесткую рабочую характеристику (температура нагнетания $q \approx const$) [8]. Оказалось, что при таком режиме нагнетания длину трещины гидроразрыва l можно определить по числу зарегистрированных импульсов АЭ J при ее скачкообразном росте от начальной длины l_0 , образованной щелеобразователем, по следующей формуле:

$$l = l_0 e^{J/k_e}, \quad (1)$$

где коэффициент k_e устанавливается по результатам опытного нагнетания.

Следовательно, параметр J можно использовать для качественной оценки площади образованной трещины.

Установлено также, что при гидрорыхлении угольного пласта насосом с жесткой рабочей характеристикой оптимальное значение темпа нагнетания q_{opt} , при котором до момента прорыва жидкости по растущим трещинам в ближайшую выработку в пласт поступит объем жидкости Q , можно определить по формуле:

$$q_{opt} = \frac{Q}{a(Q-V)^2}, \quad (2)$$

где коэффициенты a и V определяются по результатам опытного нагнетания.

Приведенная формула свидетельствует о том, что в первом приближении оптимальный темп нагнетания обратно пропорционален закачанному в пласт объему жидкости до момента, когда растущие трещины гидрорыхления достигнут обнаженной поверхности выработки.

Оптимальное значение ΔJ активности АЭ, сопровождающей скачкообразный рост трещин, следующим образом изменяется во времени t :

$$\Delta J_{opt} = \frac{\delta_1}{t - \delta_2 \sqrt{t}}, \quad (3)$$

где параметры δ_1 и δ_2 также устанавливаются по результатам опытного нагнетания.

Из этого выражения видно, что за исключением небольшого начального участка активность АЭ монотонно убывает во времени.

Известно также, что гидрорыхление можно осуществлять и в режиме, в котором обеспечивается постоянство активности АЭ. Чтобы

обеспечить это условие необходимо регулировать темп нагнетания. Оптимальные значения активности АЭ и темпа нагнетания для этого режима рассмотрены в работе [9]. Сложность использования этого режима заключается в том, что в настоящее время нет насосных установок, позволяющих плавно изменять темп нагнетания жидкости. На практике регулировка темпа нагнетания на единицу длины скважины осуществляется либо сбросом части жидкости с выхода насоса на его вход, либо увеличением длины фильтрующей части скважины, либо подключением к насосу одновременно нескольких скважин.

Эффективность гидрообработки кровли и угольного пласта можно оценить в том числе по снижению напряженного состояния в призабойном пространстве. Для этого предлагается использовать метод спектрально-акустического контроля – по отношению амплитуд высокочастотной и низкочастотной частей спектра работающего горного оборудования (комбайна, буровой установки и др.), поскольку известно, что этот параметр определяется преимущественно величиной средних напряжений [10]. Этому способствует установленное аналитически и экспериментально то обстоятельство, что отношение амплитуд высокочастотной и низкочастотной частей спектра работающего горного оборудования контролирует лишь относительные изменения действующих напряжений и поэтому рядом исследователей называется коэффициентом относительных напряжений [11].

Однако использование этого метода для указанной задачи осложнено рядом недостатков. Во-первых, к настоящему времени нет методики, увязывающей показатель относительных напряжений спектрально-акустического метода с величиной действующих напряжений. Во-вторых, при использовании спектрально-акустического метода для оценки опасности проявления динамических или газодинамических явлений в настоящее время нет и методики определения критического значения показателя относительных напряжений, при достижении которого призабойная зона горного массива теряет устойчивость. В-третьих, коэффициент относительных напряжений зависит, кроме напряженного состояния, еще от целого ряда параметров горного массива: его структуры (мощностей угольного пласта, непосредственной и основной кровли; расстояния между источником звука и их приемником; коэффициента затухания звука в угле исследуемого пласта и других [12]). Поэтому нужна методика дифференциации влияния напряжен-

ного состояния на коэффициент относительных напряжений от воздействия других параметров.

Таким образом, методы акустической эмиссии и спектрально-акустический позволяют контролировать процесс гидрообработки углепородного массива и оценивать влияние гидрообработки на напряженное состояние обработанной зоны и ее выбросоудороопасность. Причем метод АЭ удобно применять для контроля процесса развития трещин, а спектрально-акустический – для оценки напряженного состояния обработанной зоны массива. Однако для практического применения эти методы необходимо

доработать в методическом плане и в совершенствовании программно-аппаратных средств по их реализации.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-17-01143).

The study was carried out through a grant from the Russian Science Foundation (project No. 17-17-01143).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Клишин, В.И. Проблемы безопасности и новые технологии подземной разработки угольных месторождений / В.И. Клишин, Л.В. Зворыгин, А.В. Лебедев, А.В. Савченко. Рос. акад. наук. Сиб. отд-ние, Ин-т горного дела. – Новосибирск: Издательский дом «Новосибирский писатель», 2011. – 524 с.
2. Клишин В.И. Методы направленного гидроразрыва труднообрушающихся кровель для управления горным давлением в угольных шахтах / В.И. Клишин, А.М. Никольский, Г.Ю. Опрук, А.А. Неверов, С.А. Неверов // Уголь. - 2008.- № 11.- С.12-16.
3. Ножкин Н.В. Заблаговременная дегазация угольных месторождений. - М.: Недра, 1979. - 271 с.
4. Чернов О.И. Подготовка шахтных полей с газовыбросоопасными параметрами / О.И. Чернов, Е.С. Розанцев. - М.: Недра, 1975. - 287 с.
5. Инструкция по безопасному ведению горных работ на пластах, опасных по внезапным выбросам угля (породы) и газа (РД 05-350-00). Предупреждение газодинамических явлений в угольных шахтах (Сборник документов). – М.: Государственное предприятие НТЦ по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России, 2000. – С. 120-303.
6. Чернов О.И. Прогноз внезапных выбросов угля и газа / О.И. Чернов, В.Н. Пузырев. – М.: «Недра», 1979. – 296 с.
7. Грешников В.А. Акустическая эмиссия. Применение для испытаний материалов и изделий/ В.А. Грешников, Ю.Б. Дробот. - М.: Изд-во стандартов, 1976. - 272 с.
8. Насосы типа Т [Электронный ресурс]. - URL: <http://promenergochim.ru/static/doc/0000/0000/0217/217186.4fo7ytautm.pdf> (дата обращения 21.04.2017).
9. Шадрин А. В. Сейсмоакустическая реакция угольного массива на процесс его гидрообработки // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1983. - №6. - С. 29-34.
10. Шадрин, А.В. Акустический двухчастотный метод контроля напряженного состояния горного массива / А.В. Шадрин, М.В. Дегтярева // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2013, №1.2. – С. 55-59.
11. Копылов К.Н. Автоматизированная система контроля состояния массива горных пород и прогноза динамических явлений / К.Н. Копылов, О.В. Смирнов, А.И. Кулик, А.И. Пальцев // Безопасность труда в промышленности, 2015. №8. С. 32-37.
12. Шадрин А.В. Задачи совершенствования спектрально-акустического прогноза динамических явлений в угольных шахтах / А.В. Шадрин, А.А. Контримас // Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов: науч. журнал / Сиб. гос. ун-т; под общей ред. В.Н. Фрянова. – Новокузнецк, 2017. – №3. С.408-413.

REFERENCES

1. Klishin, V., Zvorygin, L., Lebedev, A., & Savchenko, A. (2011). *Problemy bezopasnosti i novyye tekhnologii podzemnoy razrabotki ugol'nykh mestorozhdeniy* [Problems of safety and new technologies for underground mining of coal deposits]. Novosibirsk: Publishing house "Novosibirsk writer." [In Russian.]
2. Klishin, V., Nikol'skiy, A., Opruk, G., Neverov, A., & Neverov, S. (2008). *Metody napravlennogo gidrorazryva trudnoobrushayushchikhsya krovel' dlya upravleniya gornym davleniyem v ugol'nykh shakhtakh* [Methods of directional fracturing of hard-to-break roofing to control mining pressure in coal mines]. *Ugol - Coal*, (11), 12-16. [In Russian].
3. Nozhkin, N. (1979). *Zablavremennaya degazatsiya ugol'nykh mestorozhdeniy* [Advance decontamination of coal deposits]. Moscow: Nedra. [In Russian].
4. Chernov, O., & Rozantsev, E. (1975). *Podgotovka shakhtnykh poley s gazovybrosoopasnymi parametrami* [Preparation of mine fields with gas-vysokopasnymi parameters]. Moscow: Nedra. [In Russian].
5. *Instruktsiya po bezopasnomu vedeniyu gornykh rabot na plastakh, opasnykh po vnezapnym vybrosam uglya (porody) i gaza (RD 05-350-00). Preduprezhdeniye gazodinamicheskikh yavleniy v ugol'nykh shakhtakh (Sbornik dokumentov)*. [Instructions for the safe management of mining operations on formations that are dangerous for sudden releases of coal (rock) and gas (RD 05-350-00). Prevention of gas-dynamic phenomena in coal mines (Collection of documents)]. (2000). *Gosudarstvennoye predpriyatiye NTTs po bezopasnosti v promyshlennosti Gosgortekhnadzora Rossii - The State Enterprise of the SEC for Safety in Industry of the Gosgortekhnadzor of Russia*. (pp. 120-303). Moscow. [In Russian].
6. Chernov, O., & Puzyrev, V. (1979). *Prognoz vnezapnykh vybrosov uglya i gaza* [Forecast of sudden emissions of coal and gas]. Moscow: Nedra. [In Russian].

7. Greshnikov, V., & Drobot, Y. (1976). Akusticheskaya emissiya. Primeneniye dlya ispytaniy materialov i izdeliy [Acoustic emission. Application for testing of materials and products]. Moscow: Izdatel'stvo standartov. [In Russian].
8. Promyshlennyye nasosy katalog 2013 [Industrial Pumps Catalog 2013]. (2013). Retrieved from <http://promenergochim.ru/static/doc/0000/0000/0217/217186.4fo7ytayvm.pdf> [In Russian].
9. Shadrin, A. (1983). Seismoakusticheskaya reaktsiya ugol'nogo massiva na protsess yego gidroobrabotki [Seismoacoustic reaction of a coal massif to the process of its hydrotreatment]. *Fiziko-Tekhnicheskiye Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopayemykh - Physical And Technical Problems Of Mining*, (6), 29-34. [In Russian].
10. Shadrin, A., & Degtyareva, M. (2013). Akusticheskiy dvukhchastotnyy metod kontrolya napryazhennogo sostoyaniya gornogo massiva [Acoustic two-frequency method for controlling the stressed state of a mountain massif]. *Vestnik Nauchnogo Tsentra Po Bezopasnosti Rabot V Ugol'noy Promyshlennosti - Bulletin Of Research Center For Safety In Coal Industry*, 2(1), 55-59. [In Russian].
11. Kopylov, K., Smimov, O., Kulik, A., & Pal'tsev, A. (2015). Avtomatizirovannaya sistema kontrolya sostoyaniya massiva gornyx porod i prognoza dinamicheskikh yavleniy [Automated system for monitoring the state of the rock massif and predicting dynamic phenomena]. *Bezopasnost' Truda V Promyshlennosti - Labor Safety In Industry*, (8), 32-37. [In Russian].
12. Shadrin, A., & Kontrimas, A. (2017). Zadachi sovershenstvovaniya spektral'no-akusticheskogo prognoza dinamicheskikh yavleniy v ugol'nykh shakhtakh [Problems of improving the spectral-acoustic forecast of dynamic phenomena in coal mines]. *Naukoyemkiye Tekhnologii Razrabotki I Ispol'zovaniya Mineral'nykh Resursov - Science-Intensive Technologies For The Development And Use Of Mineral Resources*, (3), 408-413. [In Russian].