

DOI: 10.25558/VOSTNII.2022.80.16.001

УДК 622.831.322

© А.В. Шадрин, А.С. Телегуз, 2022

А.В. ШАДРИН

д-р техн. наук,
главный научный сотрудник
Институт угля ФИЦ УУХ СО РАН,
г. Кемерово
e-mail: avsh-357@mail.ru



А.С. ТЕЛЕГУЗ

младший научный сотрудник
Институт угля ФИЦ УУХ СО РАН,
г. Кемерово
e-mail: alexanderteleguz@rumbler.ru



АЛГОРИТМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТЕРИЯ ВЫБРОСООПАСНОСТИ ДЛЯ ВАРИАНТОВ ИСПОЛНЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНО-АКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДА ПРОГНОЗА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА МЕДИАНЫ АМПЛИТУДНО- ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ «ШУМА» РАБОТАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ

Приведено обоснование алгоритмов экспериментального определения критерия выбросоопасности для двух вариантов метода текущего прогноза, основанных на анализе медианы амплитудно-частотной характеристики «шума» работающего «по углю» оборудования. Первый вариант предназначен для периодической оценки критерия выбросоопасности при прогнозе по пласту, не содержащему дизъюнктивных и пликативных нарушений и сохраняющему примерно постоянную структуру пласта и вмещающих пород. В этом случае газовый фактор выбросоопасности и прочность угля сохраняются примерно постоянными и увеличение выбросоопасности может быть вызвано в основном изменением горного давления, регистрируемым по спектру «шума» работающего оборудования. Вторым вариантом предназначен для непрерывного расчета критерия выбросоопасности по результатам показаний концентрации метана в атмосфере выработки и периодическим измерениям прочности угля и предназначен для пластов, характеризующихся наличием нарушений и/или изменчивостью структуры массива горных пород. При определении критериев используются результаты выполняемого в том же забое выработки геомеханического метода прогноза по начальной скорости газовыделения и выходу штыба при бурении скважины.

Ключевые слова: УГОЛЬНЫЙ ПЛАСТ, ТЕКУЩИЙ ПРОГНОЗ ВЫБРОСООПАСНОСТИ, ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ И ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ, КРИТЕРИЙ ВЫБРОСООПАСНОСТИ, АЛГОРИТМ НАСТРОЙКИ.

Введение. Правилами безопасности в угольных и сланцевых шахтах регламентируется оснащать горные выработки шахт системами и средствами, обеспечивающими безопасное ведение горных работ [1]. Эти системы должны быть объединены в многофункциональные системы безопасности (МФСБ).

Современные МФСБ на угольных шахтах, разрабатывающих угрожаемые и опасные по проявлению динамических явлений (ДЯ) пласты, должны включать в свой состав подсистему непрерывного текущего прогноза внезапных выбросов (сокращенно ПСПВ) угля и газа и сходных с ними явлений в процессе ведения горных работ [2].

Регламентируемые нормативным документом [3] методы прогноза можно разделить на два класса: геомеханические (иное название в литературных источниках прошлых лет — инструментальные) и геофизические. Прогноз геомеханическими методами основан на отборе проб угля и газа при бурении контрольных скважин, что позволяет оценить реально влияющие на выбросоопасность факторы. Поэтому часть этих методов, наиболее полно контролирующая основные влияющие факторы выбросоопасности, характеризуется высокой достоверностью прогноза. Методы требуют остановки забоя, поэтому установленная ими опасность зависит от промежутка времени между остановкой забоя и проведением прогноза. Между тем наибольшая опасность возникает в процессе ведения горных работ. Обеспечить прогноз в движущемся забое может только автоматизированная система, построенная с использованием геофизических методов контроля геомеханического состояния массива. Однако геофизические методы контролируют параметры, которые косвенно зависят от основных влияющих факторов. Поэтому требуется «настройка» показателей выбросоопасности геофизических методов с помощью геомеханических методов, одновременно выполняемых с геофизическими. При этом геомеханический метод используется как эталонный, подтвердивший высокую достоверность прогноза в течение длительного времени.

Выбор эталонного метода должен удовлетворять условиям подобия. Оба метода должны учитывать основные факторы выбросоопасности. Показатели и критерии выбросоопасности должны быть обоснованы единой моделью подготовки внезапного выброса, в данном случае — силовой. Значения показателей выбросоопасности обоих методов — положительные и возрастают с ростом опасности проявления ДЯ.

Цель данной работы: обосновать алгоритмы определения критерия выбросоопасности угольного пласта для спектрально-акустического метода с использованием результатов геомеханического метода текущего прогноза по начальной скорости газовыделения и выхода буровой мелочи.

СУЩНОСТЬ ПРИМЕНЯЕМЫХ В НАСТОЯЩЕЕ ВРЕМЯ НА ШАХТАХ РОССИИ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ И ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ТЕКУЩЕГО ПРОГНОЗА ВЫБРОСООПАСНОСТИ

Для обоснования наиболее подходящего геомеханического метода прогноза для «настройки» геофизического метода кратко рассмотрим сущность разновидностей этих методов текущего прогноза выбросоопасности.

Действующим в настоящее время нормативным документом регламентируется применение следующих геомеханических методов текущего прогноза выбросоопасности [3]: по структуре угольного пласта; по начальной скорости газовыделения; по начальной скорости газовыделения и выходу буровой мелочи.

Метод «по структуре угольного пласта» лишь оценивает потенциальную возможность внезапного выброса по двум факторам выбросоопасности: прочности угля и косвенно — по газовому фактору. Последнее утверждение обусловлено способностью перемятого угля адсорбировать в себе большие объемы газа, который может достаточно быстро десорбироваться в возникающие при разгрузке призабойного пространства трещины и поры

разных размеров и создать в них высокое давление. Однако реальное наличие газа в пласте, количественное значение его давления и газоносности метод не учитывает.

Критерием этого метода прогноза является наличие смежных угольных пачек, суммарной мощностью 0,2 м и более и средней прочностью $q \leq 75$ у.е., замеренной прочностным П-1 конструкции ИГД им. А.А. Скочинского [3]. Данный критерий не имеет строгого аналитического обоснования и применяется чаще всего на тех участках, которые по соответствующей методике отнесены к угрожаемой по выбросам зоне, но выбросы там либо еще не происходили, либо отмечались лишь в недоразвитом виде малой силы, например, в форме внезапного выдавливания с повышенным газовыделением и т. п. Чаще всего этого бывает достаточно для отнесения шахтопласта к выбросоопасному. Преимущество этого критерия — в простоте и быстроте выполнения.

Поскольку этот критерий носит лишь приближенный оценочный характер влияния прочности угля на выбросоопасность, количественно не учитывает газовый фактор и совсем не учитывает фактор горного давления, он взят с большим «запасом», что обуславливает низкую достоверность прогноза.

Следующий метод прогноза — «по начальной скорости газовыделения» — помимо оценки прочности угля по наличию в нем низкопрочной пачки, количественно оценивает газовый фактор выбросоопасности по начальной скорости газовыделения при поинтервальном бурении скважины по наименее прочной пачке. Критерием выбросоопасности для данного метода прогноза является превышение начальной скорости газовыделения 4 л/мин за исключением Донецкого бассейна, где этот параметр может принимать значения 4,0–5,0 л/мин в зависимости от выхода летучих из проб угля [3].

Данный критерий основан на многочисленных экспериментальных исследованиях на шахтах всех угольных бассейнов России, согласно которым при начальной скорости газовыделения менее 4,0 л/мин выбросы никогда не происходили [4]. Кроме того, этот метод

предполагает, что газовый фактор выбросоопасности преобладает над фактором горного давления, что не всегда оправдано. Так, например, на глубоких шахтах Донбасса угольные пласты малой мощности в призабойном пространстве сильно пережаты и свободного газа в этой зоне относительно мало. Поэтому внезапные выбросы здесь чаще всего начинаются с локального горного удара, который приводит к разгрузке некоторой области газонасыщенного угольного пласта. Из-за этого начинается интенсивная десорбция газа и горный удар перерастает во внезапный выброс угля и газа. Таким образом, в описанных условиях фактор горного давления имеет существенное значение.

Недостаток этого метода заключается в том, что он не учитывает фактор горного давления. Это обуславливает недостаточную достоверность текущего прогноза ДЯ.

Следующий метод текущего прогноза — по начальной скорости газовыделения и выходу буровой мелочи. Этот метод был создан в результате анализа экспериментальной информации о произошедших внезапных выбросах на шахтах Востока России. Согласно этим данным, если при начальной скорости газовыделения при бурении контрольных шпуров $i_{\max} < 4,5$ л/мин·м внезапные выбросы никогда не происходили, то при $i_{\max} > 7$ л/мин·м выбросы происходили практически всегда. Для области значений $4,5 \text{ л/мин·м} \leq i_{\max} \leq 7 \text{ л/мин·м}$ выбросы могут произойти, а могут и не произойти. Профессор В.Н. Пузырев объяснил эту неоднозначность влиянием на выбросоопасность напряженного состояния, прочности и других характеристик угля. Для их учета он предложил показатель выбросоопасности R , основанный на статистической обработке большого количества экспериментальных данных о начальной скорости газовыделения и выходе буровой мелочи при бурении контрольных шпуров, полученных в зонах произошедших выбросов [5]. Благодаря учету основных факторов выбросоопасности, данный геомеханический метод до сих пор рекомендован к применению на шахтах Востока России. Измеряемые параметры

контролируют основные факторы выбросоопасности, а именно: с достаточной достоверностью можно считать, что начальная скорость газовыделения характеризует газовый фактор выбросоопасности, а выход штыба — напряженное состояние пласта и остаточную прочность угля (чем выше горное давление и менее прочный уголь, тем выше выход штыба с 1 погонного метра скважины).

В работе [6] приведена количественная оценка достоверности прогноза различных разновидностей метода, из которой следует, что в настоящее время наиболее достоверным из геомеханических является метод «по начальной скорости газовыделения и выходу буровой мелочи». Поэтому в качестве эталонного для настройки геофизического выбираем этот метод.

В настоящее время известны две разновидности метода «по начальной скорости газовыделения и выходу буровой мелочи». Для первой показатель выбросоопасности R получен на основании статистической обработки экспериментальных данных [5]. В качестве эталонного эта разновидность метода не может быть использована, т. к. не удовлетворяет условиям подобия — показатель R может принимать как положительные, так и отрицательные значения.

Для второй разновидности метод показатель B_n (индекс «п» свидетельствует о том, что показатель пригоден только для подготовительных выработок) разработан на основе силовой модели подготовки внезапного выброса и полностью удовлетворяет условиям подобия [7].

Действующим в настоящее время нормативным документом регламентируется применение следующих геофизических методов текущего прогноза выбросоопасности [3]: по акустической эмиссии (АЭ); по параметрам искусственного акустического сигнала; по данным, зарегистрированным системами аэрогазового контроля (АГК). Достоверность прогноза этими методами достаточно подробно рассмотрена в работе [6]. В ней показано, что наибольшей достоверностью текущего прогноза обладает метод «по параметрам искус-

ственного акустического сигнала», в котором критерий выбросоопасности непрерывно корректируется по данным аэрогазового контроля и прочности угля. Такой комплексный метод прогноза в отличие от метода «по параметрам искусственного акустического сигнала» будем называть спектрально-акустическим.

Спектрально-акустический метод также имеет две основных модификации. Согласно первой показатель выбросоопасности определяется как отношение высокочастотной и низкочастотной компонент спектра «шума», работающего «по углю» горного оборудования [3]. Согласно второй модификации показатель выбросоопасности определяется как отношение текущей и критической медиан амплитудно-частотного спектра «шума» работающего оборудования [8]. В данной работе мы обосновываем алгоритм «настройки» варианта спектрально-акустического метода прогноза выбросоопасности на основе анализа медианы амплитудно-частотной характеристики «шума» работающего оборудования.

СВЯЗЬ КРИТЕРИЯ ВЫБРОСООПАСНОСТИ СПЕКТРАЛЬНО-АКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДА С ПАРАМЕТРАМИ НАПРЯЖЕННОГО ГАЗОНАСЫЩЕННОГО МАССИВА УГЛЯ

В работе [9] показано, что медиана амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) «шума» работающего горного оборудования с ростом напряжений также возрастает (под медианой АЧХ понимается частота гармоник, которая делит спектр шума на две части таким образом, что сумма амплитуд всех гармоник с меньшей частотой равна сумме амплитуд всех гармоник с большей частотой). Поэтому был введен показатель выбросоопасности K_c в форме отношения текущей медианы $f_{m,c}$ к ее критическому значению $f_{m,l}$, при котором начинают создаваться условия для начала внезапного выброса угля и газа. Т. е. $f_{m,l}$ соответствует медиане АЧХ «шума» при равенстве средних текущих σ_c и предельных σ_l напряжений. Причем этот показатель связан с отношением σ_c и σ_l следующим соотношением [9]:

$$K_c = \frac{f_{m,c}}{f_{m,l}} = U \frac{\sigma_c}{\sigma_l}, \quad (1)$$

где U — безразмерный коэффициент, определяемый амплитудами гармоник на частотах текущей и предельной медиан АЧХ, замеренных у источника и у приемника:

$$U = \frac{\ln\left(\frac{A_{m,c}}{A_{m,c,0}F(r)}\right)}{\ln\left(\frac{A_{m,l}}{A_{m,l,0}F(r)}\right)}, \quad (2)$$

где $A_{m,c,0}$ и $A_{m,c}$ — амплитуды гармоники текущего значения медианы АЧХ соответственно у источника «шума» и у геофона; $A_{m,l,0}$ и $A_{m,l}$ — амплитуды критического значения медианы АЧХ соответственно у источника «шума» и у геофона; $F(r)$ — функция, учитывающая диаграмму направленности источника «шума» (например, $F(r) = 1$ — для плоской волны; $F(r) = 1/r$ — для сферической волны).

В работе [9] показано также, что с ростом текущих напряжений медиана АЧХ «шума» смещается в область высоких частот. В критическом состоянии $\sigma_c = \sigma_l$ текущее и критическое значение медиан совпадают. Отсюда следует, что показатель выбросоопасности варианта исполнения спектрально-акустического метода текущего прогноза, основанного на контроле медианы амплитудно-частотной характеристики «шума» работающего оборудования, есть величина положительная, определенная на интервале (0; 1]. Следовательно, в критическом состоянии коэффициент U должен быть равен единице.

Для определения K_c необходимо знать $f_{m,c}$ и $f_{m,l}$. Причем если определяющие их значения σ_c и σ_l установить без учета внутрипластового давления газа, то K_c будет лишь коэффициентом относительных напряжений. Если же σ_c и σ_l установить с учетом внутрипластового давления газа и прочности угля, то K_c будет показателем выбросоопасности.

С помощью выражения (1) невозможно определить зависимость текущего критического значения показателя выбросоо-

пасности $K_{c,p}$, поскольку в этом случае $\sigma_c = \sigma_l$ и зависимость от параметров напряженного состояния угля исчезает. Чтобы эту зависимость показать представим текущее предельное значение средних напряжений $\sigma_{c,l}$ в следующем виде:

$$\sigma_{c,l} = \frac{1}{\alpha} \sigma_{l,max}, \quad (3)$$

где $\sigma_{l,max}$ — максимально возможное значение средних предельных напряжений; α — безразмерный коэффициент пропорциональности.

Тогда выражение (1) преобразуется к виду:

$$K_{c,l} = \alpha U \frac{\sigma_c}{\sigma_{l,max}}. \quad (4)$$

Определим $\sigma_{l,max}$ следующим образом:

$$\sigma_{l,max} = \sigma_{c,l} + \Delta\sigma_{c,l}. \quad (5)$$

Тогда отношение текущих и максимальных предельных напряжений можно представить к виду:

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_{l,max}} = \frac{\sigma_c}{\sigma_{c,l} \left(1 + \frac{\Delta\sigma_{c,l}}{\sigma_{c,l}}\right)}. \quad (6)$$

В работе [10] получено следующее выражение для определения значения средних предельных текущих напряжений $\sigma_{c,l}$, при котором начинается выдавливание из груди забоя слоя угля толщиной x_1 и эффективным радиусом r_e в месте устья полости начинающегося выброса:

$$\sigma_{c,l} = \frac{L}{\psi} \left[9,6 \left(\frac{q}{110 - q} \right) 10^6 \frac{x_1}{r_e} - D\sqrt{Q\Omega} \right], \text{ Па}, \quad (7)$$

где L — параметр, определяемый коэффициентом бокового распора; q — прочность угля, измеряемая прочностномером П-1 конструкции ИГД им. А.А. Скочинского, у.е.; ψ — коэффициент, определяющий долю площади выдавливаемого участка, вдоль которой берега

трещины, отделяющей участок от остального массива, плотно контактируют, б.е.; D — параметр, определяемый фильтрационно-коллекторскими свойствами угля, Па·м^{-3/2}·с^{1/2}; Q — производительность вентилятора местного проветривания (ВМП), м³/с; Ω — концентрация метана в атмосфере выработки у забоя, %.

Из (7) получим выражение для определения $\sigma_{l,max}$ при условии, что в угле нет газа ($D = 0$), а прочность угля имеет значение $q = 100$ у.е., характерное для весьма прочного угля:

$$\sigma_{l,max} \approx \frac{L}{\psi} 10^8 \frac{x_1}{r_e} \quad (8)$$

Подставив (6) и (7) в (4), получим при условиях $U=1$ и $\frac{\sigma_c}{\sigma_{c,l}} = 1$ следующее выражение: для определения текущего критического значения показателя выбросоопасности через параметры, определяющие напряженное состояние призабойного пространства:

$$K_{c,l} = \alpha \frac{0,1 \left(\frac{q}{110-q} \right) P_0 - 10^{-2} D_1 \sqrt{Q\Omega}}{P_0}, \quad (9)$$

где $P_0 = 10^6$ Па; $D_1 = D \frac{r_e}{x_1}$. Причем по определению $K_{c,l} = 1$.

Очевидно, что равенство (9) удовлетворяется при огромном множестве значений α , q , D_1 . Поскольку уравнение (9) одно, а неизвестных три, для решения задачи разработки методики определения критического значения показателя выбросоопасности необходимо сделать ряд допущений.

Первое допущение связано с прочностью угля q . А именно, чтобы с увеличением параметра Ω величина $K_{c,l}$ всегда уменьшалась, необходимо чтобы числитель дроби в (9) был больше нуля при любом q . В Инструкции... [3] определено, что при $q < 75$ у.е. и мощности пачки угля больше 0,2 м угольный пласт относится к выбросоопасным. По данным НЦ ВостНИИ (профессор В.С. Зыков), минимальная прочность угля, при которой

происходят внезапные выбросы угля и газа, составляет приблизительно 55 у.е. При меньшей прочности происходит внезапное высыпание угля с повышенным газовыделением. Следовательно, из условия

$$0,1 \left(\frac{q}{110-q} \right) P_0 \geq 10^{-2} D_1 \sqrt{Q\Omega} \quad (10)$$

при $q = 55$ у.е. получаем, что

$$D_1 \leq \frac{10P_0}{\sqrt{Q\Omega}}, \text{ МПа} \cdot \text{м}^{-3/2} \cdot \text{с}^{1/2}. \quad (11)$$

Это условие означает, что вклад газового фактора выбросоопасности не превышает вклада, обусловленного минимальной прочностью угля.

Далее покажем, что параметры α и D_1 можно определить экспериментально по результатам выполненного последовательно во времени в одном и том же забое выработки прогноза двумя методами: «по начальной скорости газовыделения и выхода буровой мелочи» и «по медиане искусственного акустического сигнала».

Вначале выполняется геомеханический метод прогноза. Согласно [7], показатель выбросоопасной зоны в окрестности подготовительной выработки B_{II} геомеханического метода текущего прогноза определяется выражением:

$$B_n = \frac{\theta(g_{n,max}^* - g_{n,z}^*)S_e}{n\Pi_{g,max}}, \quad (12)$$

где: $\theta = 1,25$ мин/л — постоянный коэффициент; $g_{n,max}^*$ и $g_{n,z}^*$ — максимальное значение приведенной начальной скорости газовыделения соответственно по длине шпура и в первом (ближайшем к забоя) интервале скважины, л/мин; S_e и Π соответственно — площадь (м²) и периметр (м) выбросоопасной пачки угля в плоскости забоя; n — коэффициент крепости угля по М.М. Протодяконову; $l_{g,max}$ — расстояние от забоя до середины интервала скважины, для которого установлено значение $g_{n,max}$ м.

Здесь под приведенной начальной скоростью газовыделения понимается ее величина, пересчитанная (приведенная) с учетом того, что вследствие деформации стенок скважины под действием горного давления выход штыба значительно превосходит величину, равную проектному объему пробуренной скважины без учета деформации стенок [7]. Соответственно возрастает и начальная скорость газовыделения.

Приведенное значение начальной скорости газовыделения с интервала скважины g_i^* связано с измеренным значением начальной скорости газовыделения $g_{н.изм}$ (л/мин) и выходом бурового штыба Z (л/м) следующим образом [7]:

$$g_i^* = g_{н.изм} \sqrt{\frac{2}{Z_{max}}}. \quad (13)$$

Коэффициент крепости n в шахте удобно измерять прочностномером П-1 конструкции ИГД им. А.А. Скочинского. Связь между коэффициентом крепости n и показанием q прочностномера П-1 следующая [7]:

$$n = \frac{0,4q}{110 - q}. \quad (14)$$

После определения значения $B_{n,e}$ показателя выбросоопасности геомеханическим методом выполняют прогноз спектрально-акустическим методом при проходке проходческим комбайном участка, на котором был выполнен геомеханический метод прогноза. При этом определяют максимальное экспериментальное значение концентрации метана $\Omega_{e,max}$. Зная производительность ВМП Q_e и $\Omega_{e,max}$, определяют по формуле (11) параметр D_1 .

Критические значения обоих показателей выбросоопасности вида (9) и (12) определяются отношением активных и пассивных сил при их равенстве и поэтому они равны единице.

Следовательно, правая часть уравнения (9) равна единице. Отсюда

$$\alpha = \frac{P_0}{0,1 \left(\frac{q}{110 - q} \right) P_0 - 10^{-2} D_1 \sqrt{Q\Omega}}. \quad (15)$$

Поскольку в формуле (15) величина параметра D_1 , определенная по формуле (11), может быть меньше реальной, параметр α получается также меньше соответствующего реальным условиям. Это означает, что рассчитанная величина критерия выбросоопасности оказывается меньше величины, соответствующей реальной опасности. Т. е. критерий взят «с запасом».

Таким образом, определены все три параметра α_e , q и D_{1e} , входящие в (9). Такой подход позволяет обосновать методику приближенного определения текущего критического значения показателя выбросоопасности спектрально-акустического метода при непрерывной коррекции его в зависимости от концентрации метана.

Полученные результаты явились основанием для разработки двух алгоритмов — для методик периодической и непрерывной «настройки» критерия выбросоопасности варианта спектрально-акустического метода прогноза выбросоопасности на основе анализа медианы амплитудно-частотной характеристики «шума» работающего оборудования.

АЛГОРИТМЫ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ И НЕПРЕРЫВНОЙ «НАСТРОЙКИ» КРИТЕРИЯ ВЫБРОСООПАСНОСТИ СПЕКТРАЛЬНО-АКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА МЕДИАНЫ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ «ШУМА» РАБОТАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ

Разработка двух алгоритмов «настройки» критерия выбросоопасности обусловлена следующим. Первый вариант «настройки» предназначен для метода прогноза на основе контроля медианы АЧХ, позволяющего контролировать лишь влияние на выбросоопасность горного давления без учета изменчивости газового фактора и прочности угля

(аналогично этому методу в настоящее время осуществляется прогноз методом «по параметрам искусственного акустического сигнала»).

Второй вариант алгоритма «настройки» предназначен для разрабатываемого в настоящее время спектрально-акустического метода, в котором критерий выбросоопасности непрерывно автоматизировано корректируется по формуле (9). В ней для непрерывного учета газового фактора и периодического — изменений прочности угля необходимо определить параметры α и D_1 . Покажем, как можно осуществить на практике оба варианта.

Алгоритм периодической «настройки» критерия выбросоопасности. Задача «настройки» в нашем случае заключается в определении критического значения медианы $f_{m,l}$ в формуле (1). Покажем, что это можно сделать экспериментально по результатам выполненного последовательно во времени в одном и том же забое выработки прогноза двумя методами: «по начальной скорости газовыделения и выходу буровой мелочи» и «по медиане искусственного акустического сигнала».

Оба метода основаны на силовой модели подготовки внезапного выброса, в которой показатель выбросоопасности равен отношению активных (вызывающих выброс) и пассивных (препятствующих выбросу) сил. Поэтому для обоих методов критическое значение показателя выбросоопасности равно единице $B_{n,l} = K_{c,l} \equiv 1$, когда активные силы равны пассивным. Но тогда и текущие значения показателей выбросоопасности обоими методами должны быть равны, т. е.:

$$B_{n,c,e} = K_{c,e} = \frac{f_{m,c}}{f_{m,l}}. \quad (16)$$

Отсюда получаем выражение для определения критического значения медианы АЧХ «шума» работающего оборудования:

$$f_{m,l} = \frac{f_{m,c,e}}{B_{n,e}}. \quad (17)$$

Однако достоверность результата такого определения при последующем ведении вы-

работки будет достигаться при условии, если не наблюдается усугубление выбросоопасной ситуации, а именно: не произошло заметное увеличение концентрации метана в атмосфере выработки, не увеличилась мощность нарушенной пачки угля или не уменьшилась значительно ее прочность. Это обусловлено тем, что измеряемая величина показателя выбросоопасности методом «по медиане искусственного акустического сигнала» зависит преимущественно от горного давления и не учитывает газовый фактор и прочность угля. В случае изменения выбросоопасной ситуации цикл «настройки» необходимо повторить.

Алгоритм непрерывной «настройки» критерия выбросоопасности. В этом виде «настройки» также используем результаты последовательно выполняемых геомеханического и геофизического методов прогноза.

Вначале измеряем прочность наиболее слабой пачки угля q_e и выполняем метод прогноза «по начальной скорости газовыделения и выходу штыба». Выполнив необходимые измерения по формуле (12), определяем показатель выбросоопасности $B_{n,e}$.

Затем выполняем прогноз «по медиане искусственного акустического сигнала» на глубину выработки, равную длине шпура при выполнении геомеханического метода прогноза. При этом измеряем концентрацию метана в атмосфере выработки у забоя и регистрируем спектр АЧХ сигнала «шума» комбайна. В результате определяем максимальное значение концентрации метана Ω_{\max} и максимальное значение медианы АЧХ сигнала $f_{e,\max}$.

Далее в соответствии с (11) находим экспериментальное значение параметра $D_{1,e}$ при максимальном измеренном значении концентрации метана $\Omega_{\max,e}$

$$D_{1,e} = \frac{10P_0}{\sqrt{Q\Omega_{\max,e}}} \quad (18)$$

и рассчитываем в соответствии с (15) и (18) экспериментальное значение параметра α_c :

$$\alpha_e = \frac{1}{0,1 \left(\frac{q_e}{110 - q_e} \right) - 0,1}. \quad (19)$$

Подставив (18) и (19) в (9), получим выражение для определения текущего предельного значения показателя выбросоопасности с учетом установленных значений для α и D_1

$$K_{c,l} = \frac{\left(\frac{q}{110 - q} \right) - \sqrt{\frac{\Omega}{\Omega_{\max,e}}}}{\left(\frac{q_e}{110 - q_e} \right) - 1}, \quad (20)$$

где q и Ω — текущие значения прочности угля концентрации метана в атмосфере выработки.

Поскольку относительные значения выбросоопасности, определенные как отношение текущего значения выбросоопасности к ее предельному значению, для обоих методов равны, справедливо равенство:

$$\frac{K_{c,e}}{K_{c,l}} = \frac{B_{n,e}}{B_{n,l}}, \quad (21)$$

где $B_{n,e}$ и $K_{c,e}$ — текущие экспериментальные значения соответственно геомеханического и геофизического показателя выбросоопасности; а $B_{n,l}$ и $K_{c,l}$ соответственно их предельные значения. Причем $B_{n,l} = 1$. Тогда из (21) получим:

$$K_{c,e} = K_{c,l} \cdot B_{n,e}. \quad (22)$$

Но по определению $K_{c,e}$ равен отношению текущего экспериментального значения медианы АЧХ сигнала $f_{m,c}$ к ее текущему предельному значению $f_{m,l}$:

$$K_{c,e} = \frac{f_{m,c}}{f_{m,l}}. \quad (23)$$

Из (22) и (23) имеем:

$$f_{m,l} = \frac{f_{m,c}}{K_{c,l} \cdot B_{n,e}}. \quad (24)$$

Подставив в (24) значение $K_{c,l}$ из (20), получим окончательное выражение для определения текущего предельного значения медианы АЧХ сигнала «шума» работающего оборудования:

$$f_{m,l} = \frac{f_{m,c} \left[\left(\frac{q_e}{110 - q_e} \right) - 1 \right]}{\left[\left(\frac{q}{110 - q} \right) - \sqrt{\frac{\Omega}{\Omega_{\max,e}}} \right] B_{n,e}}. \quad (25)$$

Данное выражение позволяет корректировать текущее предельное значение медианы АЧХ «шума» по показаниям концентрации метана в атмосфере выработки и прочности угля наименее прочной пачки пласта, тем самым учитывать изменения газового фактора, а также прочности угля и фактора горного давления. Здесь значения q_e , $\Omega_{\max,e}$, $B_{n,e}$ получены экспериментально в процессе выполнения последовательно двух методов прогноза в одном забое.

На основании полученных результатов был разработан проект Методики определения критического значения показателя выбросоопасности спектрально-акустического метода текущего прогноза для подготовительных выработок угольных шахт, который предстоит проверить в шахтных условиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В настоящее время методы текущего прогноза газодинамических явлений на основе спектрального анализа акустических сигналов, генерируемых работающим оборудованием, находят все более широкое применение благодаря достаточно высокой достоверности прогноза. Оборудование всех фирм-производителей, реализующее этот метод, сегодня определяет показатель опасности в форме отношения амплитуд высокочастотной и низкочастотной частей спектра сигнала. При этом каждый производитель оборудования, как правило, по-своему определяет области высоких и низких частот. Поэтому возможны ошибки в прогнозе, если приближение к опасной зоне приведет к из-

менениям не контролируемой части спектра. Чтобы исключить этот недостаток прогноза, мы разрабатываем метод, в котором показатель опасности определяется как отношение текущей медианы амплитудно-частотного спектра всего широкополосного сигнала к ее критическому значению.

2. На спектральный состав «шума» работающего оборудования влияют преимущественно горное давление, прочностные свойства угля и слоистость структуры горного массива, включающего угольный пласт и вмещающие породы. Мощности (толщина) этих слоев существенно влияют на спектральный состав «шума». При этом поскольку акустические колебания распространяются преимущественно по твердому скелету массива, величина внутрипластового давления газа практически не оказывает влияния на спектр сигнала. Таким образом, методы прогноза, основанные только на спектральном анализе «шума» оборудования, газовый фактор выбросоопасности не учитывают. Поэтому часто показатель опасности такого метода прогноза называют коэффициентом относительных напряжений. Чтобы учесть газовый фактор при определении показателя выбросоопасности мы предлагаем допол-

нить прогноз по спектру «шума» измерением концентрации метана в атмосфере выработки у забоя и прочности угля.

3. Многочисленными исследованиями установлено, что из-за огромного многообразия параметров, характеризующих строение углевмещающего массива и его напряженное состояние, обусловленное горным и газовым давлением и прочностными характеристиками, единого критерия опасности для всех выработок не существует. Его надо определять в каждом конкретном случае, по сути — непрерывно в процессе ведения выработки. В нашей работе мы предложили алгоритм такого определения путем использования результатов прогноза выбросоопасности геомеханическим методом, для которого этот критерий обоснован многолетними предыдущими исследованиями и включен в нормативные документы.

Источники финансирования: исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Кемеровской области в рамках научного проекта № 20-45-420014.

Статья поступила в редакцию 17.12.2021

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила безопасности в угольных шахтах: федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности. М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2021. Сер. 05. Вып. 40. 200 с.
2. Шадрин А.В. Функциональная часть подсистемы прогноза выбросоопасности многофункциональной системы безопасности угольной шахты // Безопасность труда в промышленности. 2020. № 6. С. 72–78.
3. Инструкция по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений: федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности. М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2021. Сер. 05. Вып. 49. 128 с.
4. Пузырев В.Н., Вершинин Н.Г. Совершенствование метода прогноза выбросоопасных и неопасных зон по газовыделению из шпуров // Борьба с газом, внезапными выбросами и пожарами в угольных шахтах: Тр. ВостНИИ. Кемерово, 1975. Т. 24. С. 144–160.
5. Чернов О.И., Пузырев В.Н. Прогноз внезапных выбросов угля и газа. М.: Недрра, 1979. 296 с.
6. Шадрин А.В., Телегуз А.С., Дилюк Ю.А. Анализ учета основных факторов выбросоопасности существующими методами текущего прогноза // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. 2021. № 2. С. 56–72.
7. Зыков В.С. Внезапные выбросы угля и газа и другие газодинамические явления в шахтах. Кемерово: Институт угля и углехимии СО РАН, 2010. 333 с.

8. Shadrin A.V., Kontrimas A.A., Teleguz A.S. Comparative analysis of options for applying spectral-acoustic method of gas-dynamic phenomena forecasting // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 206. 2018. P. 012042.

9. Шадрин А.В., Контримас А.А. Медиана амплитудно-частотной характеристики шумов работающего горного оборудования как показатель выбросоопасности // Безопасность труда в промышленности. 2019. № 12. С. 27–35.

10. Shadrin A., Diyuk Y. Geophysical criterion of pre-outburst coal out squeezing from the face space into the working // International Journal of Mining Science and Technology. 2019. Vol. 29. Issue 3. P. 499–506.

DOI: 10.25558/VOSTNII.2022.80.16.001

UDC 622.831.322

© A.V. Shadrin, A.S. Teleguz, 2022

A.V. SHADRIN

Doctor of Engineering Sciences,

Chief Researcher

Institute of Coal «The FRC of Coal and Coal Chemistry of SB of RAS», Kemerovo

e-mail: avsh-357@mail.ru

A.S. TELEGUZ

Junior Researcher

Institute of Coal «The FRC of Coal and Coal Chemistry of SB of RAS», Kemerovo

e-mail: alexanderteleguz@rumbler.ru

ALGORITHMS FOR DETERMINATION OF EMISSION CRITERION FOR VERSIONS OF SPECTRAL-ACOUSTIC PREDICTION METHOD BASED ON ANALYSIS OF MEDIAN AMPLITUDE-FREQUENCY CHARACTERISTIC OF «NOISE» OF OPERATING EQUIPMENT

Substantiation of algorithms of experimental determination of emission hazard criterion for two versions of current prediction method based on analysis of median amplitude-frequency characteristic of «noise» of equipment operating «by coal» is given. The first version is intended for periodic evaluation of emission hazard criterion at prediction on formation, which does not contain disjunctive and plicative disturbances and maintains approximately constant structure of formation and containing rocks. In this case, the gas emission factor and coal strength remain approximately constant and the increase in emission hazard can be caused mainly by a change in mountain pressure recorded from the noise spectrum of the operating equipment. The second version is intended for continuous calculation of the emission hazard criterion based on the results of methane concentration readings in the working atmosphere and periodic measurements of coal strength and is intended for formations characterized by the presence of disturbances and/or variability of the rock mass structure. When defining criteria, results of geomechanical method of prediction of initial gas release rate and pin output during well drilling performed in the same bottomhole are used.

Keywords: COAL BED, CURRENT EMISSION FORECAST, GEOMECHANICAL AND GEOPHYSICAL METHODS, EMISSION CRITERION, ADJUSTMENT ALGORITHM.

REFERENCES

1. Safety rules in coal mines: federal norms and rules in the field of industrial safety. Moscow: CJSC STC PB, 2021. Ser. 05. Issue 40. 200 p. [In Russ.].

2. Shadrin A.V. The functional part of the subsystem for predicting the emission hazard of a multifunctional safety system of a coal mine // *Industrial safety [Bezopasnost truda v promyshlennosti]*. 2020. No. 6. P. 72–78. [In Russ.].

3. Instructions for the prediction of dynamic phenomena and monitoring of rock mass during mining of coal deposits: federal norms and rules in the field of industrial safety. Moscow: CJSC STC PB, 2021. Ser. 05. Issue 49. 128 p. [In Russ.].

4. Puzyrev V.N., Vershinin N.G. Improvement of the forecast method of hazardous and non-hazardous zones for gas release from boreholes // *Fighting gas, sudden emissions and fires in coal mines: Proceedings VostNII. Kemerovo, 1975. Vol. 24. P. 144–160. [In Russ.]*.

5. Chernov O.I., Puzyrev V.N. Forecast of sudden emissions of coal and gas. Moscow: Nedra, 1979. 296 p. [In Russ.].

6. Shadrin A.V., Teleguz A.S., Diyuk Yu.A. Analysis of accounting for the main factors of emission hazard by existing methods of the current forecast // *Bulletin of the VostNII Scientific Center for Industrial and Environmental Safety [Vestnik Nauchnogo centra VostNII po promyshlennoj i ekologicheskoj bezopasnosti]*. 2021. No. 2. P. 56–72. [In Russ.].

7. Zykov V.S. Sudden emissions of coal and gas and other gas-dynamic phenomena in mines. Kemerovo: Institute of Coal and Coal Chemistry SB RAS, 2010. 333 p. [In Russ.].

8. Shadrin A.V., Kontrimas A.A., Teleguz A.S. Comparative analysis of options for applying spectral-acoustic method of gas-dynamic phenomena forecasting // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 206. 2018. P. 012042.

9. Shadrin A.V., Kontrimas A.A. Median of the amplitude-frequency characteristic of the noise of working mining equipment as an indicator of the emission hazard // *Industrial safety [Bezopasnost truda v promyshlennosti]*. 2019. No. 12. P. 27–35. [In Russ.].

10. Shadrin A., Diyuk Y. Geophysical criterion of pre-outburst coal outskueezing from the face space into the working // *International Journal of Mining Science and Technology*. 2019. Vol. 29. Issue 3. P. 499–506.