

DOI: 10.25558/VOSTNII.2022.49.33.001

УДК 622.831.322

© А.В. Шадрин, Ю.А. Диюк, Ли Хи Ун, 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



Ю.А. ДИЮК

инженер
Институт угля ФИЦ УУХ СО РАН,
г. Кемерово
e-mail: juliabireva@gmail.com



ЛИ ХИ УН

д-р техн. наук, проф.,
Ученый секретарь
АО «НЦ ВостНИИ», г. Кемерово
e-mail: leeanatoly@mail.ru



ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТЕРИЯ ВЫБРОСООПАСНОСТИ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ ДЛЯ МЕТОДОВ ТЕКУЩЕГО ПРОГНОЗА, ОСНОВАННЫХ НА СПЕКТРАЛЬНОМ АНАЛИЗЕ «ШУМА» РАБОТАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ

Приведено обоснование алгоритмов экспериментального определения критерия выбросоопасности (критического значения показателя выбросоопасности) для двух методов прогноза, основанных на расчете показателя выбросоопасности в форме отношения амплитуд высокочастотной и низкочастотной компонент спектра «шума» работающего «по углю» оборудования.

Первый вариант предназначен для периодического определения критерия выбросоопасности при прогнозе методом «по параметрам искусственного акустического сигнала». Второй вариант предназначен для спектрально-акустического метода прогноза, в котором осуществ-

ляется непрерывное регулирование критерия выбросоопасности для метода «по параметрам искусственного акустического сигнала» путем коррекции его значения в соответствии с непрерывно измеряемой концентрацией метана в атмосфере выработки и эпизодически измеряемой прочностью угля.

Оба варианта основаны на результатах прогноза выбросоопасности последовательно выполненными геомеханическим («по начальной скорости газовыделения» или «по начальной скорости газовыделения и выхода буровой мелочи» при бурении скважины) и геофизическим методами в одном и том же забое. При этом указанный геомеханический метод является эталонным, т. к. им основные факторы выбросоопасности: горное и газовое давление и прочность угля — оцениваются в массиве впереди забоя выработки.

Ключевые слова: УГОЛЬНЫЙ ПЛАСТ, ТЕКУЩИЙ ПРОГНОЗ ВЫБРОСООПАСНОСТИ, ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ И ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ, ПОКАЗАТЕЛЬ И КРИТЕРИЙ ВЫБРОСООПАСНОСТИ, АЛГОРИТМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ.

ВВЕДЕНИЕ

На угольных шахтах России все шире применяется геофизический метод текущего прогноза выбросоопасности «по параметрам искусственного акустического сигнала». Для реализации метода в непрерывном режиме применяется стационарная аппаратура, выпускаемая рядом фирм-изготовителей. На шахтах АО «СУЭК-Кузбасс» применяемый тип такой аппаратуры называется САКСМ. В этом методе текущее значение показателя выбросоопасности K_m определяется в форме отношения текущих значений амплитуд высокочастотной и низкочастотной компонент спектра «шума» работающего «по углю» горного оборудования [1]:

$$K_m = \frac{A_{в,м}}{A_{н,м}}, \quad (1)$$

где $A_{в,м}$ и $A_{н,м}$ — текущие значения амплитуд акустических шумов работающего горного оборудования (чаще всего это проходческий или очистной комбайн), измеренные на расстоянии d от источника, соответственно на высоких и низких частотах, В.

Амплитуда акустических колебаний A с удалением от источника изменяется по закону [2]:

$$A = A_u a(d) e^{-\beta d}, \quad (2)$$

где A_u — амплитуда сигнала у источника, В;

$a(d)$ — закон изменения амплитуды с расстоянием вследствие расхождения волнового фронта акустических колебаний, обусловленного диаграммой направленности источника (приблизительно работающее оборудование можно воспринимать как источник сферических акустических колебаний с обратно пропорциональной зависимостью амплитуды от расстояния до приемника); β — коэффициент затухания, m^{-1} ; d — расстояние от источника до приемника звука, м.

Подставив (2) в (1) и учтя зависимость коэффициента затухания α от частоты и напряжений [2], получим:

$$K_m = A_0 \exp\left(-Cd \frac{\sigma_{м,нр}}{\sigma_m}\right), \quad (3)$$

где $A_0 = A_{у,в}/A_{у,н}$ — отношение амплитуд высокочастотной и низкочастотной компонент шума работающего оборудования, измеренных непосредственно у его источника; σ_m и $\sigma_{м,нр}$ — средние соответственно текущее и текущее предельное напряжения на участке между источником и приемником «шума» в анализируемый момент времени, Па; C — параметр, определяемый затуханием акустического сигнала на этом участке массива, m^{-1} [2].

Из (1) видно, что, т. к. амплитуды акустических сигналов положительные, определенный так показатель выбросоопасности также всегда положителен. Причем область значений показателя в общем случае лежит в пределах $K_m \in (0; n \geq 1)$.

Данный метод прогноза обладает рядом

недостатков, снижающих достоверность прогноза [3]. Одним из них является весьма приближенная методика определения критического значения показателя выбросоопасности (критерия выбросоопасности), изложенная в руководстве по аппаратуре САКСМ. Она заключается в определении критерия выбросоопасности на участке пласта, о котором заранее известно, что он неопасен [1, 4]. При этом величина критического значения определяется как сумма среднего значения показателя выбросоопасности, полученного при проведении не менее 30 циклов проходки выработки, и двух-трех значений среднеквадратичного отклонения этой величины от среднего значения. Такая методика позволяет обнаружить вход в зону с резким возрастанием напряжений. Однако истинного критического значения показателя выбросоопасности она не дает. Следовательно, определенное таким образом критическое значение показателя опасности не является действительно критическим, допускает ошибки первого и второго рода в достоверности прогноза и свидетельствует лишь о том, что при нем раньше выбросы не происходили.

Цель данной работы — обосновать алгоритмы определения критерия выбросоопасности для вариантов прогноза выбросоопасности геофизическими методами, основанными на анализе спектра «шума» работающего оборудования в форме (1).

КРИТЕРИИ ВЫБРОСООПАСНОСТИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПРОГНОЗА, ОСНОВАННЫХ НА АНАЛИЗЕ СПЕКТРА «ШУМА» РАБОТАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ

Таких методов два: широко апробированный метод «по параметрам искусственного акустического сигнала» и разрабатываемый спектрально-акустический. Здесь под спектрально-акустическим методом понимается совокупность одновременно применяемых двух геофизических методов контроля напряженного состояния призабойного пространства: «по параметрам искусственного акустического сигнала» и газоаналитического (основанного на оценке давления газа в пла-

сте по концентрации его в атмосфере выработки у ее забоя в процессе отбойки угля), а также экспресс-метода определения прочности угля прочностномером П-1 (в соответствии с [1]). Эти методы в комплексе позволяют учесть основные факторы выбросоопасности, соответственно: горное (гравитационное) давление, внутрислоевого давление газа и прочность угля в отличие от метода «по параметрам искусственного акустического сигнала», который практически контролирует только горное давление [5].

Известен еще один метод прогноза выбросоопасности, основанный на спектральном анализе «шума» работающего оборудования. В нем показатель выбросоопасности определяется как отношение текущей и критической медиан амплитудно-частотного спектра «шума» работающего оборудования [6]. В данной работе критерий выбросоопасности для него не рассматривается.

Для каждого из названных геофизических методов прогноза нами предлагается свой вариант определения критического значения показателя выбросоопасности $K_{кр}$. Оба предлагаемых варианта определения основаны на результатах прогноза выбросоопасности последовательно выполненными геофизическим («по начальной скорости газовыделения» или «по начальной скорости газовыделения и выхода буровой мелочи» при бурении скважины) и геофизическим методами в одном и том же забое. При этом указанный геомеханический (традиционное название — инструментальный) метод является эталонным, т. к. им факторы выбросоопасности оцениваются непосредственно в массиве впереди забоя выработки: начальная скорость газовыделения определяет газовый фактор выбросоопасности, а выход штыба — горное давление и прочность угля [3]. Одновременная оценка двух факторов выбросоопасности по выходу буровой мелочи обусловлена тем, что эта величина тем больше, чем больше горное давление и меньше прочность угля. К тому же достаточно высокая достоверность прогноза инструментальными методами подтверждена многолетним

применением на шахтах, разрабатывающих угрожаемые и выбросоопасные пласты.

Первый вариант определения текущего значения критерия выбросоопасности (критического значения показателя выбросоопасности) предназначен для эпизодического сравнения критерия выбросоопасности метода «по параметрам искусственного акустического сигнала», определенного в соответствии с Руководством [4], с критерием выбросоопасности, определенным в этом же забое указанным выше геомеханическим методом непосредственно перед выполнением прогноза геофизическим методом. Для этого варианта текущее критическое значение показателя выбросоопасности геофизического метода $K_{m,кр,1}$ определится следующим образом [5]:

$$K_{m,кр,1} = \frac{K_{m,э,1}}{B_{m,э}} B_{m,кр}, \quad (4)$$

где $B_{m,э}$ и $K_{m,э,1}$ — экспериментальные текущее значение показателей выбросоопасности соответственно геомеханического метода, процедура выполнения которого изложена в [6], и метода «по параметрам искусственного акустического сигнала»: $B_{m,кр}$ — текущее критическое значение показателей выбросоопасности геомеханического метода.

Определенное таким образом значение $K_{m,кр,1}$ справедливо только для участка пласта, на котором выполнено его определение. Это объясняется тем, что метод «по параметрам искусственного акустического сигнала» контролирует преимущественно напряженное состояние, обусловленное гравитационным давлением, практически никак не реагируя на газовый фактор выбросоопасности. В связи с этим основное его назначение — сравнить с показателем выбросоопасности, определенным в соответствии с [4], тем самым оценить достоверность его определения.

Определенное в соответствии с (4) текущее критическое значение показателя выбросоопасности можно использовать при дальнейшем ведении выработки в случае, если показания концентрации метана в атмосфере

выработки у забоя и прочность угля сохраняются примерно постоянными. В противном случае процедуру определения $K_{m,кр,1}$ следует повторить.

Второй вариант определения критерия выбросоопасности предназначен для спектрально-акустического метода прогноза, в котором осуществляется непрерывное регулирование критического значения показателя выбросоопасности путем коррекции его значения в соответствии с непрерывно измеряемой концентрацией метана в атмосфере выработки и эпизодически измеряемой прочностью угля. Приведем его обоснование.

Текущее критическое значение показателя выбросоопасности $K_{m,кр,1}$ можно определить из выражения (3) при $\sigma_{m,нр} = \sigma_m$.

$$K_{m,кр,1} = A_0 \exp(-Cd). \quad (5)$$

Однако при такой форме определения $K_{m,кр}$ не видна зависимость критерия выбросоопасности от газового фактора и прочности угля. Чтобы показать эту зависимость выразим следующим образом $\sigma_{m,нр}$ через максимально возможное предельное значение $\sigma_{max,нр}$, достигаемое при максимальном значении прочности угля, измеренное прочностномером П-1, например, $q_{max} = 100$ условных единиц (у.е.) и равенстве внутрипластового давления газа $P = 0$:

$$\sigma_{m,нр} = \alpha \sigma_{max,нр}, \quad (6)$$

где α — коэффициент пропорциональности.

Решение подобной задачи приведено в работе [5], но при условии $\sigma_{m,нр} = \sigma_{max,нр}$. Подставив в это решение условие (6), получим следующее выражение для определения текущего критического значения показателя выбросоопасности спектрально-акустического метода прогноза $K_{m,кр,2}$:

$$K_{m,кр,2} = A_0 \exp \left\{ -\alpha Cd \left[\frac{\sigma_0}{0,1 \left(\frac{q}{110-q} \right) \sigma_0 - D \sqrt{Q\Omega}} \right] \right\}, \quad (7)$$

где $\sigma_0 = 1$ Мпа — нормирующий множитель, обусловленный измерением прочност-

номером П-1 пределов прочности угля через безразмерный показатель прочности q ; Q — расход воздуха вентилятора местного проветривания (ВМП), подающего воздух в выработку, м³/с; Ω — текущее значение концентрации метана у забоя выработки, измеренное устройством для измерения концентрации метана (например, датчиком метана аппаратуры АГК), %; D — параметр, характеризующий фильтрационно-коллекторские свойства угля и ряд коэффициентов, связанных с характером и областью разрушения в соответствии с моделью двухэтапной подготовки выброса [5], МПа·м^{-3/2}·с^{1/2}.

При задании $\sigma_{m,пр}$ в форме (6) значения $K_{m,кр,1}$ и $K_{m,кр,2}$ становятся тождественно равными.

В эксперименте по определению показателей выбросоопасности последовательно геомеханическим и спектрально-акустическим методом в одном и том же забое можно измерить значения d_3 , q_3 , Q_3 и Ω_3 . Неизвестными остаются A_0 , α , C и D . Определим их.

Параметр C_3 определим из уравнения (3) при условии, что значение $K_{m,кр,1}$ определено выражением (4). Получим:

$$C_3 = -\frac{\ln\left(\frac{K_{m,кр,1,3} B_{m,кр}}{A_0 B_{m,3}}\right)}{d_3}, \text{ м}^{-1}. \quad (8)$$

По определению параметр $C > 0$ [2]. Это возможно, если $\ln\left(\frac{K_{m,кр,1,3} B_{m,кр}}{A_0 B_{m,3}}\right) < 0$.

Данное условие выполняется, если

$$0 < \frac{K_{m,кр,1,3} B_{m,кр}}{A_0 B_{m,3}} < 1. \quad (9)$$

Таким образом, в одном уравнении (7) осталось три неизвестных A_0 , α и D . Поскольку в этом случае уравнение не решается, надо ввести дополнительные условия для определения двух неизвестных параметров. Это позволит определить оставшийся третий параметр. Одно из этих условий можно обосновать следующим образом.

Чтобы с увеличением параметра Ω величина $K_{m,кр,2}$ всегда уменьшалась (с увеличением газового фактора критерий выбросоо-

пасности должен уменьшаться), необходимо чтобы выражение в квадратных скобках в (7) было больше нуля при любом q . Для этого первое слагаемое в знаменателе выражения в квадратных скобках должно быть больше второго слагаемого при минимальном значении q . В Инструкции... [1] 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 может происходить внезапное высыпание угля с повышенным газовыделением. Следовательно, из условия

$$0,1 \left(\frac{q}{110 - q} \right) \sigma_0 \geq D \sqrt{Q\Omega} \quad (10)$$

при $q = 55$ у.е. и $\sigma_0 = 1$ МПа получаем, что:

$$D_3 \leq \frac{0,1}{\sqrt{Q_3 \Omega_3}}, \text{ МПа} \cdot \text{м}^{-3/2} \cdot \text{с}^{1/2}. \quad (11)$$

Данное условие свидетельствует о том, что при сделанном допущении вклад газового фактора выбросоопасности на экспериментальном участке не превышает вклада, обусловленного существующим горным давлением и минимальной прочностью угля, при которых выброс возможен.

Из тождественного равенства $K_{m,кр,1}$ в форме (5) и $K_{m,кр,2}$ в форме (7) при условии, что D_3 определено по (11), получим следующее выражение для определения параметра α_3 :

$$\alpha_3 = 0,1 \left[\left(\frac{q_3}{110 - q_3} \right) - 1 \right]. \quad (12)$$

Подставив (8), (11) и (12) в (7), получим искомое выражение для определения критического значения показателя выбросоопасности спектрально-акустического метода прогноза:

$$K_{m,кр,2} = A_0 \exp \left\{ -0,1 \left[\left(\frac{q_2}{110-q_2} \right) - 1 \right] \cdot \ln \left(\frac{K_{m,2}}{B_2} B_{m,кр} \right) \frac{d}{d_2} \left[\frac{\sigma_0}{0,1 \left(\frac{q}{110-q} \right) \sigma_0 - \frac{0,1 \sigma_0}{\sqrt{Q_2 \Omega_2}} \sqrt{Q \Omega}} \right] \right\} \quad (13)$$

В выражении (13) остался неизвестным параметр A_0 . Предполагается, что его можно будет определить путем сравнения критериев $K_{m,кр,1}$ в форме (4) и $K_{m,кр,2}$ в форме (13), параметры которых определены по результатам выполненных на одном и том же участке пласта геомеханического и геофизического методов прогноза. Алгоритм этого определения покажем ниже.

Таким образом, получим выражение для корректировки текущего критического значения показателя выбросоопасности спектрально-акустического метода прогноза путем непрерывной подстановки в него значений Ω и d и периодически значений q и Q .

Путем использования экспериментальных данных прогноза выбросоопасности геомеханическими и геофизическими методами проверим правильность рассмотренных алгоритмов определения критериев выбросоопасности для методов «по параметрам искусственного акустического сигнала» и спектрально-акустического и их особенности.

**ПРОВЕРКА АЛГОРИТМОВ
ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТЕРИЯ
ВЫБРОСООПАСНОСТИ МЕТОДА
«ПО ПАРАМЕТРАМ ИСКУССТВЕННОГО
АКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА»
ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ
НА НЕВЫБРОСООПАСНОМ
УЧАСТКЕ ПЛАСТА**

Проверим предложенные варианты определения $K_{кр}$ для каждого из методов прогноза, выполняемого в подготовительной выработке. Типичные значения измеряемых величин при прогнозе выбросоопасности геомеханическим и геофизическим методом на неопас-

ном участке для шахт Кузбасса приведены в табл. 1. Данные взяты из следующих источников:

- о текущих значениях показателя выбросоопасности метода прогноза «по параметрам искусственного акустического сигнала» — из экспериментов на шахте им. С.М. Кирова АО «СУЭК-Кузбасс» [3];

- о начальной скорости газовыделения и выходе буровой мелочи при бурении шпуров на не опасном участке — из работ [7, 9].

При этом введены следующие обозначения:

- m (м), a (м), f_6 (б.е.), Π_6 (м) и S_6 (м²) — соответственно мощность, ширина, коэффициент крепости угля по М.М. Протодьяконову, периметр и площадь перематой пачки;

- $g_{n,i}^*$, $g_{i,i}^*$ и $g_{i,max}^*$ — соответственно начальная скорость газовыделения с i -го интервала шпура, ее приведенное и максимальное приведенное значение по длине скважины, л/мин·м;

- Z_p , Z_3 и Z_n — соответственно выход бурового штыба с i -го, с первого от забоя интервала шпура и его проектное значение, соответствующее диаметру шпура 42 мм, л/м; $Z_n = 2$ л/м;

- $i_{g_{n,max}^*}$ — номер интервала бурения шпура длиной 1 м, в котором измерено $g_{n,max}^*$, и для него находят: $l_{g_{n,max}^*} = 0,5 + i_{g_{n,max}^*}$, м.

Приведенные значения начальной скорости газовыделения рассчитываются по формулам (14), а показатель выбросоопасности — по (15) [7, 8]:

$$\left. \begin{aligned} g_{n,i}^* &= g_{n,i} \sqrt{\frac{Z_n}{Z_i}} \\ g_{n,max}^* &= g_{n,max} \sqrt{\frac{Z_n}{Z_{g_{n,max}}}} \\ g_{n,3}^* &= g_{n,3} \sqrt{\frac{Z_n}{Z_3}} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

$$B_2 = \frac{k(g_{n,max}^* - g_{n,3}^*) S_6}{f_6 \Pi_6 l_{g_{n,max}^*}} \quad (15)$$

где $k = 1,25$ мин·м/л [7].

Из (15) видно, что, поскольку $g_{n,max}^* - g_{n,z}^* \geq 0$ всегда, показатель выбросоопасности $B_3 \geq 0$. Из этого следует, что принцип подобия этого показателя выбросоопасности с определенным по формуле (1) совпадает, что позволяет использовать его для определения критериев выбросоопасности методов прогноза «по параметрам искусственного акустического сиг-

нала» и спектрально-акустического.

Вначале для определения критерия выбросоопасности геофизических методов рассмотрим использование варианта определения показателя B_3 , разработанного для подготовительной выработки [7]. Типичные значения измеряемых параметров приведены в табл. 1.

Таблица 1

Типичные значения измеряемых величин при геомеханическом и геофизическим методах прогноза на не выбросоопасном участке

Параметры для определения показателя выбросоопасности геомеханического метода прогноза					
Измеренные (ячейки без заливки) и рассчитанные (ячейки обозначены заливкой) параметры перемятой пачки угля					
Мощность пачки m , м	Ширина пачки a , м	Прочность угля q , у.е.	Периметр $P_g = 2(a+m)$, м	Площадь $S_g = a \cdot m$, м ²	Коэффициент крепости $f_g = \frac{0,4q}{110-q}$, у.е.
0,5	4	65	9	2	0,58
Измеренные параметры поинтервального контроля выбросоопасности					
Номер интервала шпура, i	1	2	3	4	5
Длина шпура, м	1,5	2,5	3,5	4,5	5,5
$g_{n,i}$, л/мин·м	1,7	2,1	2,5	1,6	2,2
Z_i , л/м	2,6	5,9	7,8	7,3	5,0
$g_{n,i}^*$, л/мин·м	1,49	1,22	1,27	0,84	1,39
Параметры, установленные по результатам измерений и расчета					
$g_{n,max}^*$, л/мин·м	$g_{n,z}^*$, л/м	i_m	$l_{g,max} = 0,5 + i_m$, м		B_3 , б. е.
1,49	1,49	1	1,5		0

Из приведенных данных видно, что в случае, когда $g_{n,max}^*$ приходится на первый интервал шпура, показатель $B_3 = 0$. Несмотря на то, что условие $g_{n,max}^* = g_{n,z}^*$ является лишь частным случаем, использовать показатель B_3 в методике для определения критерия выбросоопасности методов прогноза, основанных на спектральном анализе шума работающего оборудования, нельзя (см. (4): $K_{m.kp,1} \rightarrow \infty$). Также нельзя использовать и модификацию метода прогноза «по начальной скорости га-

зовыделения и выходу буровой мелочи из скважины», изложенный в [1], поскольку показатель выбросоопасности этого метода R может иметь как отрицательные, так и положительные значения.

Возможно, что оба варианта метода прогноза «по начальной скорости газовыделения и выходу буровой мелочи из скважины» обладают высокой достоверностью прогноза. Однако для «настройки» геофизических методов прогноза, основанных на спектральном ана-

лизе «шума» работающего оборудования, они не годятся, так как не соблюдается принцип подобия применяемых в работе геомеханических и геофизических методов прогноза, достаточно подробно рассмотренный в наших работах последних лет. Кроме того, при значениях $V_s = 0$ невозможным является и определение показателя выбросоопасности обоих вариантов алгоритма его определения для геофизического метода прогноза, поскольку не выполняется условие (9).

Выходом из этого положения является использование в качестве геомеханического метода прогноза «по начальной скорости газовыделения из скважины» [1]. Согласно этому методу, выбросоопасность возрастает с увеличением начальной скорости газовыделения и ее критическое значение равно $g_{н.кр} = 4$ л/мин·м. Таким образом, принцип подобия этого критерия выбросоопасности с критерием метода прогноза «по параметрам искусственного акустического сигнала» совпадает. Поэтому можно допустить, что относительные значения показателей выбросоопасности для геомеханического и геофизического методов, определенные как отношение текущего и кри-

тического значения показателя выбросоопасности, равны по величине:

$$\frac{g_{н.м.маx}}{g_{н.кр}} = \frac{K_{т.э.1}}{K_{т.кр.1}} \quad (16)$$

Отсюда для данных $g_{н.i}$, приведенных в табл. 1, имеем следующее выражение для определения текущего значения критерия выбросоопасности:

$$K_{т.кр.1,i} = \frac{K_{т.э.1,i} \cdot g_{н.кр}}{g_{н.м.i}}, \quad (17)$$

где максимальные значения начальной скорости газовыделениями замерены в текущий момент времени, т. е. $g_{н.i} \equiv g_{н.м.i}$.

Результаты определения $K_{т.кр.1}$ представлены в табл. 2. Здесь используются следующие обозначения: $K_{т.э.1,i}$ и $K_{т.кр.1,i}$ — текущее соответственно экспериментально измеренное значение показателя выбросоопасности методом «по параметрам искусственного акустического сигнала» при прохождении i -го интервала контроля и его критическое значение.

Таблица 2

Результаты определения критерия выбросоопасности $K_{т.кр.1}$

Параметры для определения показателя выбросоопасности метода прогноза «по параметрам искусственного акустического сигнала»					
Номер интервала шпура, i	1	2	3	4	5
$g_{н.т.i}$ л/мин·м	1,7	2,1	2,5	1,6	2,2
Ω_{max} , %	0,34	0,47	0,38	0,27	0,42
$K_{т.э.1,i}$	0,2	0,22	0,27	0,21	0,3
$K_{т.кр.1,i}$	0,47	0,42	0,43	0,53	0,55

Из таблицы видно, что область рассчитанных значений критического значения показателя выбросоопасности колеблется по мере удаления интервала скважины в глубь массива в интервале 0,43–0,55. С учетом среднеквадратичного отклонения среднее значение $K_{т.кр.1} = 0,48 \pm 0,052$ и примерно в два раза

превышает экспериментально измеренное среднее текущее значение $K_{т.э.1,ср} = 0,24 \pm 0,04$.

Таким образом, установленное по предложенной методике критическое значение показателя выбросоопасности $K_{т.кр.1} = 0,48 \pm 0,052$ примерно в 1,5 раза превышает определенное в соответствии с [4] критическое зна-

чение, равное сумме среднего за 30 циклов проходки (у нас только 5 циклов) значения и удвоенного среднеквадратичного отклонения $0,24 + 0,08 = 0,32$.

Однако, как указывалось выше, рассчитанное критическое значение $K_{т.кр.1}$ можно использовать, если показания концентрации метана в атмосфере выработки у забоя и прочность угля сохраняются примерно постоянными.

ПРОВЕРКА АЛГОРИТМОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТЕРИЯ ВЫБРОСООПАСНОСТИ СПЕКТРАЛЬНО- АКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДА ПРОГНОЗА ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ НА НЕВЫБРОСООПАСНОМ УЧАСТКЕ ПЛАСТА

Для непрерывной коррекции критерия выбросоопасности с учетом газового фактора и прочности угля необходимо по результатам последовательно выполненного прогноза на одном и том же участке пласта геомеханическим методом и методом «по параметрам искусственного акустического сигнала» определить параметры A_0 , α_3 , C_3 и D_3 , входящие в (7).

Вначале рассмотрим влияние параметров Ω , q и α на величину критического значения показателя выбросоопасности. Исходные данные для расчета берем из табл. 2. При этом будем использовать те из них, которые обеспечивают наименьшую ошибку первого рода. В частности, возьмем наибольшее измеренное значение параметра $B_{т.э} \equiv g_{н.т.х.3} = 2,5$ л/мин·м и наименьшие значения определенного критерия выбросоопасности $K_{т.кр.1.2} = 0,42$ и концентрации метана $\Omega_{\max} = 0,42$ %. При этом значение $B_{т.кр} \equiv g_{н.кр} = 4$ л/мин·м.

Удаление геофона от забоя выработки перед началом цикла ее проведения по участку, на котором предварительно выполнили геомеханический прогноз выбросоопасности, составляло $d_0 = 25$ м. В качестве величины $d_{3,i}$ в дальнейших измерениях принимали

величину: $d_{3,i} = 25 + i$, м. Среднее значение этой величины равно:

$$d_3 = d_{3,ср} = \frac{\sum_{i=1}^5 d_{3,i}}{5} = 28 \text{ м.}$$

При этих параметрах определим параметр C_3 по формуле (8), в которой вначале предположим, что параметр $A_0 = 1$ (нулевое приближение) — получили $C_{30} = 0,0142 \text{ м}^{-1}$.

Для определения параметра D_3 учтем, что в выработке применен ВМП типа ВМЭ-8 производительностью $10,0 \text{ м}^3/\text{с}$. В местах скопления метана в соответствии с Правилами безопасности... максимально допустимая концентрация метана может составлять 2 % [10]. При этих параметрах по формуле (11) определяем $D_3 = 0,022 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{-3/2} \cdot \text{с}^{1/2}$.

Такой подход к обоснованию параметра D_3 обеспечивает снижение критического значения показателя выбросоопасности с увеличением величины этого параметра для всей возможной области значений параметра q . Однако насколько определенная таким образом величина D_3 меньше или больше реального значения, определяемого обуславливающими его параметрами горного массива (газоносностью, давлением газа, проницаемостью и др. [5]), установить в данной работе не представляется возможным. Тем не менее, даже такой подход к оценке влияния газового фактора на критерий выбросоопасности нам представляется продуктивным.

Далее по формуле (12) определим параметр α_3 , который для значений прочности угля q , равных 55; 60; 65 и 75 у.е., оказался равным соответственно: 0; 0,02; 0,044 и 0,114 безразмерных единиц (б.е.). Отсюда видно, что с увеличением q возрастает область значений газового фактора выбросоопасность, при которой забой сохраняет устойчивое состояние. Значение $\alpha_3 = 0,02$ соответствует минимальному влиянию газового фактора на выбросоопасность, а $\alpha = 0,114$ — максимальному при сделанных выше допущениях.

На рис. 1 представлены графики зависимости критерия выбросоопасности $K_{т.кр.2}^0$ (нуле-

вое приближение при $A_0 = 1$) от газового фактора в соответствии с (7) при $C_{30} = 0,0142 \text{ м}^{-1}$, $d = 20 \text{ м}$, для трех значениях параметра α , равных для случаев А, Б и В соответственно: 0,02; 0,044 и 0,114 б.е.

Из рисунка видно, что с увеличением концентрации метана в атмосфере выработки Ω у забоя и уменьшением прочности угля q критерий выбросоопасности уменьшается, причем тем сильнее, чем больше параметр α , характеризующий возрастающую степень влияния газового фактора на выбросоопасность от варианта рис. 1А) до рис. 1В).

Из обоснования величины параметра D_3 , входящего в знаменатель дроби, видно, что он

соответствует минимальному значению параметра $q = 55 \text{ у.е.}$ Поэтому влияние газового фактора с этим значением параметра D_3 на величину критерия выбросоопасности (18) при более высоких реальных значениях q может быть несколько занижено. Чтобы компенсировать это ослабление влияния газового фактора параметр α_3 , входящий в числитель дроби, напротив взят в (18) для достаточно большого значения $q = 75 \text{ у.е.}$ Эта компенсация тем более существенна, потому что параметр α_3 входит сомножителем в числитель дроби, тогда как параметр D_3 входит в знаменатель дроби в качестве слагаемого.

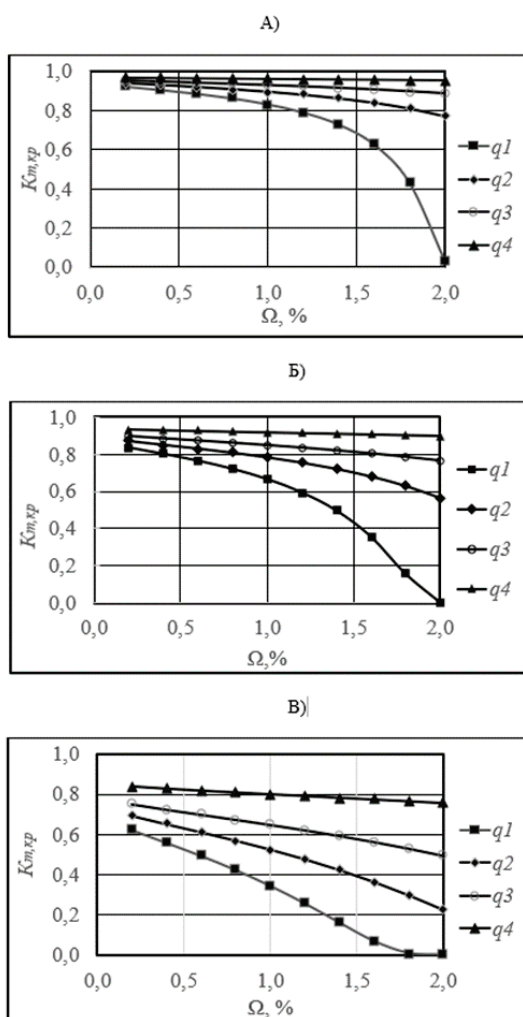


Рис. 1. Зависимость текущего критического значения показателя выбросоопасности $K_{кр.2}^0$ при $A_0 = 1$ от концентрации метана Ω в атмосфере выработки для четырех значений прочности угля q и трех значений параметра α

Далее рассмотрим алгоритм определения параметре A_0 . Данный параметр в формулах (5) и (7) является своего рода масштабным коэффициентом. Поэтому его первоначально (первое приближение) предполагается определить из сравнения результатов определения критериев $K_{m,кр.1}$, рассчитанных по формулам (4) или (17), и $K_{m,кр.2}$, рассчитанного по формуле (13). Установленное таким образом значение A_0 можно использовать для определения параметра C_3 в первом приближении по формуле (8). Определенное значение использовать для расчета $K_{m,кр.2}$ по формуле (13), которое вновь сравнить с $K_{m,кр.1}$ и определить новое значение параметра A_0 . Таким образом, методом последовательных приближений можно определить с необходимой точностью значения параметров A_0 и C_3 .

Будем считать, что определенное перед началом эксперимента значение прочности угля сохраняется на глубину до 6 м. Исследования проводили на угрожаемом по внезапным выбросам участке пласта. Поэтому в дальнейшем используем значение $\alpha_3 = 0,114$, соответствующее наиболее сильному влиянию газового фактора на выбросоопасность.

Подставив найденные значения пара-

метров: $\alpha_3 = 0,144$, $C_{30} = 0,0142 \text{ м}^{-1}$ и $D_3 = 0,022 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{-3/2}\cdot\text{с}^{1/2}$ в выражение (7), в котором мы допустили $A_0 = 1$, получим следующую формулу для определения текущего критического значения показателя выбросоопасности спектрально-акустического метода прогноза $K_{m,кр.2}^0$:

$$K_{m,кр.2}^0 = \exp \left\{ -0,162 \cdot 10^{-2} d \cdot \left[\frac{1}{0,1 \left(\frac{q}{110 - q} \right) - 0,022 \sqrt{Q\Omega}} \right] \right\}. \quad (18)$$

График этой зависимости показан на рис. 2, кривая (A_0, C_0). Из графика видно, что для значения $K_{m,кр.1.2} = 0,42$, определенного экспериментально (см. табл. 2), рассчитанное значение по (18) равно $K_{m,кр.2}^0 = 0,72$. Расчет показывает, что при этом относительная погрешность определения A_0 составляет 71,4 %.

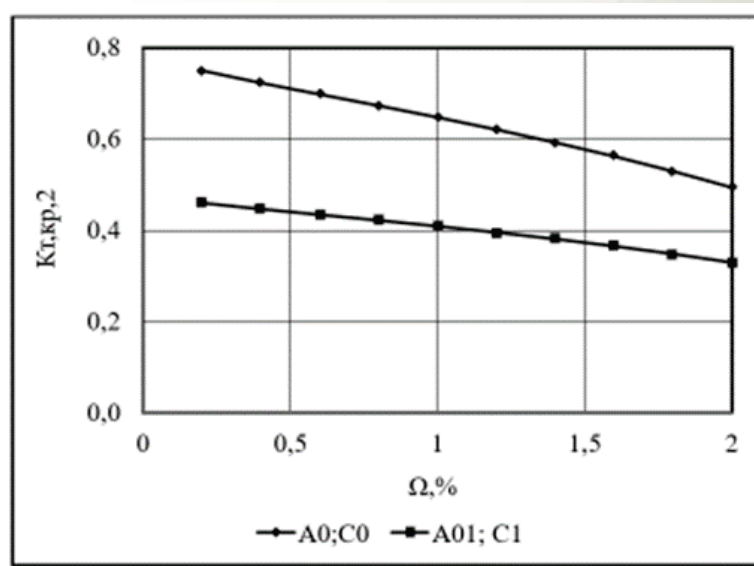


Рис. 2. Зависимость $K_{m,кр.2}$ от Ω в нулевом (A_0, C_0) и первом (A_{01}, C_1) приближении расчета параметра A_0

Представив в соответствии с (3) $K_{m.кр.1.2} = A_{01} K_{m.кр.2}^0$, находим в первом приближении масштабный параметр A_{01} :

$$A_{01} = \frac{K_{m.кр.1.2}}{K_{m.кр.2}^0} = \frac{0,42}{0,72} = 0,58.$$

Из (5) имеем: $K_{m.кр.1.2} = A_{01} \exp(-C_{01}d_3)$.

Отсюда находим $C_{01} = 0,0115$.

Подставив найденные значения параметров A_{01} , C_{01} , D_3 и α_3 в (7), получим следующее выражение для расчета критического значения показателя выбросоопасности на данном участке пласта:

$$K_{m.кр.2}^1 = 0,58 \exp \left\{ -0,13 \cdot 10^{-2} d \cdot \left[\frac{1}{0,1 \left(\frac{q}{110 - q} \right) - 0,022 \sqrt{Q\Omega}} \right] \right\}. \quad (19)$$

График зависимости вида (19) представлен на рис. 2, кривая (A_{01} , C_1). С помощью этой кривой находим, что для установленной экспериментально величины $K_{m.кр.1.2} = 0,42$ имеем определенное по (19) для $\Omega = 0,42$ % значение $K_{m.кр.2}^0 = 0,44$. Таким образом, относительная погрешность определения $K_{m.кр.2}^1$ в результате выполнения процедуры первого приближения расчета составляет примерно 4,8 %. Данный результат будем считать удовлетворительным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выбросоопасность определяется большими группами параметров газонасыщенного угленосного массива, называемыми факторами выбросоопасности: газовым фактором, фактором горного давления и прочностным фактором. Для непосредственного их контр-

оля в горном массиве применяются геомеханические методы прогноза, а для опосредованного — геофизические, основанные на наличии связи между параметрами этих методов и параметрами, характеризующими факторы выбросоопасности. Преимущество геофизических методов заключается в том, что они в значительно меньшей мере «мешают» ведению горных работ, чем геомеханические.

Существующие геофизические методы прогноза основаны на контроле преимущественно одного фактора выбросоопасности. Поэтому можно утверждать, что в настоящее время не существует геофизического метода со 100 % достоверностью прогноза.

Наибольшее распространение в последнее время получили геофизические методы, основанные на спектральном анализе «шума» работающего оборудования. Основные из них: «по параметрам искусственного акустического сигнала» и спектрально-акустический, который с целью повышения достоверности прогноза объединяет методы «по параметрам искусственного акустического сигнала», газоаналитический и метод измерения прочности наиболее перемятой пачки угольного пласта.

Важным параметром геофизических методов прогноза является критическое значение показателя выбросоопасности. Для его определения предлагается использовать данные прогноза геомеханических методов, выполненных одновременно с геофизическим, поскольку критерии выбросоопасности для геомеханических методов установлены ранее и регламентируются нормативными документами. В статье дано обоснование методики экспериментального определения критерия выбросоопасности для обоих указанных геофизических методов прогноза выбросоопасности.

Наибольшей достоверностью обладают методы: из геомеханических — по начальной скорости газовыделения и выходу буровой мелочи; из геофизических — разрабатываемый спектрально-акустический.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.

2. Шадрин А.В., Дегтярева М.В. Акустический двухчастотный метод контроля напряженного состояния горного массива // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2013. № 1–2. С. 55–59.
3. Шадрин А.В., Клишин В.И. Организация работ по предотвращению динамических явлений на шахтах АО «СУЭК-Кузбасс // Горный журнал. 2021. № 12. С. 88–93.
4. Руководство по применению системы акустического контроля состояния массива горных пород и прогноза динамических явлений (САКСМ). М.: МНТЛ РИВАС, 2016. 49 с.
5. Шадрин А.В., Диук Ю.А. Определение критерия выбросоопасности для комплексного спектрально-акустического метода прогноза // Безопасность труда в промышленности. 2019. № 8. С. 19–26.
6. Шадрин А.В., Контримас А.А., Телегуз А.С. Сравнительный анализ вариантов исполнения спектрально-акустического метода прогноза динамических явлений // Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов: науч. журнал. 2018. № 4. С. 370–375.
7. Зыков В.С. Внезапные выбросы угля и газа и другие газодинамические явления в угольных шахтах. Кемерово: Институт угля и углехимии СО РАН, 2010. 333 с.
8. Зыков В.С. Обоснование показателя степени выбросоопасности призабойной части угольного пласта // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2020. № 2. С. 32–37.
9. Чернов О.И., Пузырев В.Н. Прогноз внезапных выбросов угля и газа. М.: «Недра», 1979. 296 с.
10. Правила безопасности в угольных шахтах: федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности. М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2020. Сер. 05. Вып. 40. 198 с.

DOI: [10.25558/VOSTNII.2022.49.33.001](https://doi.org/10.25558/VOSTNII.2022.49.33.001)

UDC 622.831.322

© A.V. Shadrin, Yu.A. Diyuk, Lee Hee Un, 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

Yu.A. DIYUK

Engineer

Institute of Coal «The FRC of Coal and Coal Chemistry of SB of RAS», Kemerovo
e-mail: juliabireva@gmail.com

LEE HEE UN

Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Scientific Secretary
JSC «NC VostNII», Kemerovo
e-mail: leeanatoly@mail.ru

DETERMINATION OF COAL SEAM SUDDEN OUTBURST OF GAS AND COAL HAZARD CRITERION FOR CURRENT FORECAST METHODS BASED ON SPECTRAL ANALYSIS OF «NOISE» OF OPERATING EQUIPMENT

The justification of algorithms for experimental determination of the sudden outburst of gas and coal hazard criterion (critical value of the emission hazard indicator) for two prediction methods based on calculation of the sudden outburst of gas and coal hazard indicator in the form of the ratio of amplitudes of the high-frequency and low-frequency components of the spectrum of «noise» of the equipment operating on coal is provided.

The first option is intended for periodic determination of the sudden outburst of gas and coal hazard criterion when predicting by the «artificial acoustic signal» method. The second version is intended for spectral-acoustic method of prediction, in which continuous regulation of criterion of sudden outburst of gas and coal hazard is carried out for method «by parameters of artificial acoustic signal» by correction of its value in accordance with continuously measured concentration of methane in atmosphere of production and occasionally measured strength of coal.

Both cases are based on geomechanical («in terms of initial gas release velocity» or «in terms of initial gas release velocity and drilling fines exit» during well drilling) and geophysical methods in the same bottomhole. At the same time, the specified geomechanical method is a reference method, since they have the main emission hazard factors: rock and gas pressure and coal strength are evaluated in the massif ahead of the mining face.

Keywords: COALSEAM, CURRENT FORECAST OF EMISSION HAZARD, GEOMECHANICAL AND GEOPHYSICAL METHODS, INDICATOR AND CRITERION OF EMISSION HAZARD, DETERMINATION ALGORITHMS.

REFERENCES

1. 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. M.: CJSC «STC PB». 2021. Ser. 05. Issue 49. 128 p. [In Russ.].
2. Shadrin A.V., Degtyareva M.V. Acoustic two-frequency method for monitoring the stress state of a mountain massif // Bulletin of the Scientific Center for the Safety of Work in the Coal Industry [Vestnik Nauchnogo centra po bezopasnosti rabot v ugolnoj promyshlennosti]. 2013. No. 1-2. P. 55–59. [In Russ.].
3. Shadrin A.V., Klishin V.I. Organization of work to prevent dynamic phenomena at the mines of JSC «SUEK-Kuzbass» // Mining Journal [Gornyj zhurnal]. 2021. No. 12. P. 88–93. [In Russ.].
4. Guidelines for the application of the system of acoustic monitoring of the state of the rock mass and prediction of dynamic phenomena (SAKSM). M.: MNTL RIVAS, 2016. 49 p. [In Russ.].
5. Shadrin A.V., Diyuk Yu.A. Determination of the emission hazard criterion for the complex spectral-acoustic forecasting method // Occupational safety in industry [Bezopasnost truda v promyshlennosti]. 2019. No. 8. P. 19–26. [In Russ.].
6. Shadrin A.V., Kontrimas A.A., Teleguz A.S. Comparative analysis of variants of the spectral-acoustic method of forecasting dynamic phenomena // High-tech technologies for the development and use of mineral resources: scientific journal [Naukoemkie tekhnologii razrabotki i ispolzovaniya mineralnyh resursov: nauchnyj zhurnal]. 2018. No. 4. P. 370–375. [In Russ.].
7. Zykov V.S. Sudden emissions of coal and gas and other gas-dynamic phenomena in coal mines. Kemerovo: Institute of Coal and Coal Chemistry SB RAS, 2010. 333 p. [In Russ.].
8. Zykov V.S. Substantiation of the indicator of the degree of emission hazard of the bottom-hole part of the coal seam // Bulletin of the Scientific Center for the Safety of Work in the Coal Industry [Vestnik Nauchnogo centra po bezopasnosti rabot v ugolnoj promyshlennosti]. 2020. No. 2. P. 32–37. [In Russ.].
9. Chernov O.I., Puzyrev V.N. Forecast of sudden emissions of coal and gas. M.: «Nedra», 1979. 296 p. [In Russ.].
10. Safety rules in coal mines: federal norms and rules in the field of industrial safety. M.: CJSC STC PB, 2020. Ser. 05. Issue 40. 198 p. [In Russ.].