

DOI: 10.25558/VOSTNII.2024.76.26.001

УДК 622.831.322

© А. В. Шадрин, 2024

А. В. ШАДРИН

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



СУЩНОСТЬ МЕТОДОВ ПРОГНОЗА ВЫБРОСООПАСНОСТИ УГЛЯ, ОСНОВАННЫХ НА СПЕКТРАЛЬНОМ АНАЛИЗЕ «ШУМА» РАБОТАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ

Изложена сущность прогноза динамических явлений на основе спектрального анализа «шума» работающего горного оборудования. Выбросоопасность количественно оценивается коэффициентом относительных напряжений, определенным через параметры спектра «шума». Рассмотрены преимущества и недостатки трех алгоритмов определения коэффициента относительных напряжений.

Ключевые слова: УГОЛЬНЫЙ ПЛАСТ, ПОДГОТОВИТЕЛЬНАЯ ВЫРАБОТКА, ВЫБРОСООПАСНОСТЬ, МЕТОДЫ ТЕКУЩЕГО ПРОГНОЗА, СПЕКТР «ШУМА» РАБОТАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема борьбы с динамическими (ДЯ) и газодинамическими (ГДЯ) явлениями в угольных шахтах возрастает с интенсификацией горных работ и увеличением глубины разработки. Наиболее сложными и опасными из них являются внезапные выбросы угля и газа и горные удары.

Анализ признаков выбросоопасности угольных пластов, зарегистрированных перед этим явлением в призабойном пространстве, а также известных моделей потери устойчивости горного массива при протекании этого явления, свидетельствует о том, что основными факторами, определяющими выбросоопасность, являются напряженное состояние призабойного пространства, внутрислоевого давления свободного газа и прочность угля. Поэтому известные способы прогноза динамических явлений, в том числе

автоматизированного прогноза геофизическими методами, основаны на контроле одного или нескольких этих факторов (геофизических методов одновременного контроля всех основных факторов пока в производственной практике нет).

В последнее время из методов автоматизированного прогноза наибольшее развитие получил тот, который основан на анализе спектрального состава шумов работающего горного оборудования, прошедшего через контролируемый участок призабойного пространства горного массива. Данный метод в разные годы в литературных источниках и нормативных документах имел различное название. Исторически первое его название — метод прогноза по амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) пласта [1]. Данное название не прижилось, по-видимому, потому что слишком длинное и не очень понятное горнякам.

Последующее его название — акустический [2]. Оно также не прижилось, т.к. акустических методов контроля горного массива очень много и его сущность в названии не просматривается. В действующих в настоящее время нормативных документах этот метод называется «по параметрам искусственного акустического сигнала» [3].

История появления данного метода следующая. На основании обработки спектров «шумов», записанных примерно на 300 км магнитной ленты при прогнозе выбросоопасности аппаратурой типа ЗУА методом акустической эмиссии, группа С. В. Мирера установила, что при приближении выработки к выбросоопасной зоне амплитуды высокочастотных составляющих спектра шумов работающего горного оборудования возрастали сильнее, чем амплитуды низкочастотных составляющих. Поэтому их отношение было определено как показатель выбросоопасности.

К настоящему времени известно несколько модификаций этого метода, реализованных оборудованием как с аналоговой, так и с цифровой формой обработки полезного сигнала.

Цель данной работы: проанализировать известные варианты исполнения метода прогноза «по параметрам искусственного акустического сигнала» при прогнозе выбросоопасности методами, основанными на спектральном анализе «шума» работающего комбайна в подготовительной выработке угольной шахты.

ФИЗИЧЕСКАЯ ОСНОВА ПРОГНОЗА ДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ НА ОСНОВЕ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА «ШУМА» РАБОТАЮЩЕГО ГОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Осуществляют метод следующим образом. При контроле напряженного состояния массива впереди очистной выработки приемник акустических колебаний (датчик) устанавливают в борт вентиляционного и (или) конвейерного штреков впереди очистной выработки и поэтому акустический сигнал от работающего оборудования проходит через

контролируемую зону горного массива по прямой линии.

Иначе обстоит дело при прогнозе опасности ГДЯ впереди подготовительной выработки. В этом случае акустический датчик устанавливают на расстоянии от 10 (и более) до 40–50 м позади забоя выработки. Несмотря на это обеспечивается контроль некоторой зоны массива впереди выработки, и объясняется это следующим образом.

Рабочий орган горного оборудования в процессе разрушения угля является источником звука с широкой диаграммой направленности, т.е. звук распространяется практически во всех направлениях. При этом на амплитуду принятого сигнала будет влиять состояние значительной части горного массива, расположенного между источником и приемником звука: напряженное состояние, структура и состав горного массива, его трещиноватость и слоистость, влажность и др. Однако акустический сигнал распространяется по твердому каркасу массива и поэтому давление газа в трещинах влияние на распространение звука практически не оказывает. Если бы источник и приемник звука находились на одной прямой, проходящей по горному массиву, то область массива, влияющую на амплитуду принятого сигнала, можно было бы приближенно принять равной цилиндру диаметром не менее половины длины волны, ось которого совпадает с прямой, соединяющей приемник с излучателем [4]. Оценим размеры этого цилиндра для спектрально-акустического метода, в котором приемниками акустических колебаний являются геофоны с областью рабочих частот 20–1500 Гц. При скорости распространения звука по углю, примерно равной 1100–1300 м/с, рабочие длины волн лежат в интервале $\lambda = 0,7–65$ м. Следовательно, если бы звук от излучателя к приемнику распространялся по прямой, то на амплитуду принятого сигнала вследствие затухания оказывала бы влияние масса угля, расположенного в объеме «трубки» диаметром 0,4–32,5 м (здесь не учитываются отраженные волны от границ раздела пласта и углевмещающих пород). На

эту минимальную глубину, наполовину меньшую из регистрируемых длин звуковых волн (рассматривается предельный, самый неблагоприятный случай), осуществлялось бы зондирование горного массива впереди подготовительной выработки в случае, если в качестве источника зондирующих шумов использовался проходческий комбайн.

Однако приемник звука находится не на прямой, соединяющей его с источником, а в своеобразной области звуковой тени. Звук распространяется от режущего органа комбайна вдоль забоя выработки, и затем часть акустической энергии будет распространяться вдоль выработки к месту установки приемника. Поэтому на результирующее акустическое поле у приемника будет влиять дифракция звука в области изменения направления его распространения. Качественную оценку влияния дифракции звука можно получить, применив принцип Гюйгенса [5].

Суть принципа заключается в том, что гармоническую волну с фронтом любой формы можно представить состоящей из большого числа простых сферических волн одинаковой частоты (так называемых элементарных волн), каждая из которых распространяется из своей исходной точки и имеет свои начальные фазу и амплитуду. При этом любой волновой фронт можно рассматривать как огибающую всех таких элементарных волн, исходные точки которых располагаются на прежнем фронте волны (см. рис. 1) [6, 7]. При широком спектре колебаний это правило нужно применить к каждой спектральной составляющей. Вследствие этого в призабойном пространстве в устье лучевой трубки, расположенной вдоль борта выработки, в котором установлен геофон, будут попадать вторичные сферичные элементарные волны, излученные фронтами результирующих волн, расположенных впереди забоя подготовительной выработки.

Поэтому реальную схему распространения звука можно заменить на эквивалентную, в которой своеобразный «эффективный источник» вынесен впереди реального за поверхность забоя на расстояние, равное

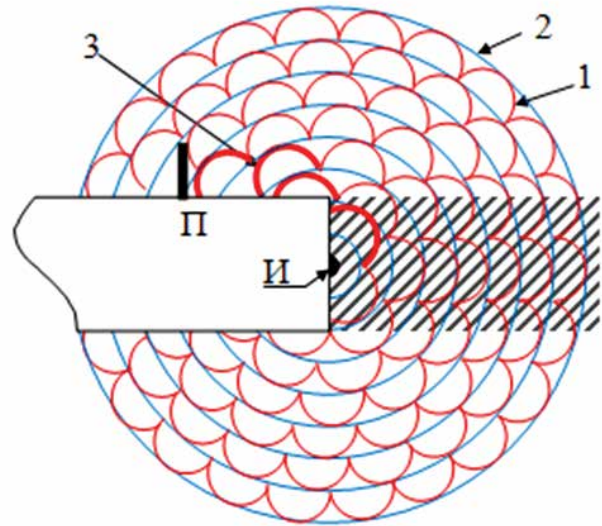


Рис. 1. Схема распространения одной гармоники звука от излучателя до приемника в соответствии с принципом Гюйгенса: 1 — элементарные сферические волны; 2 — фронт результирующей волны; 3 — траектория распространения полуволны от источника звука И к приемнику П

нескольким минимальным для используемого геофона длинам волн, так, что «эффективный источник» и приемник звука расположены на линии, близкой к прямой (рис. 2 [7]). При этом приближение забоя выработки к области нарушения (или границе проекции вышележащего целика) будет сопровождаться ростом средних напряжений, а также отражением в сторону забоя выработки части акустической энергии от неоднородностей зоны нарушения. Здесь I и $I_{эф}$ — соответственно реальный и эффективный излучатель; Π — приемник акустических колебаний.

Теперь рассмотрим, как влияет напряженное состояние горного массива на показатель метода прогноза «по параметрам искусственного акустического сигнала».

Рабочий орган комбайна возбуждает в горном массиве акустические колебания в широком диапазоне частот. Эти колебания распространяются по горному массиву от источника до приемника, установленного в короткой скважине, пробуренной в борт выработки, на некотором расстоянии от забоя подготовительной выработки или впереди лавы на расстоянии до 50 м [3]. За пределами

этого расстояния полезный сигнал становится соизмеримым или даже меньшим акустического фона, обусловленного работой другого горношахтного оборудования. Амплитуда звуковых колебаний A с удалением от источника изменяется по закону:

$$A = A_u F(r) e^{-\alpha r}, \quad (1)$$

где A_u — амплитуда сигнала источника, В; $F(r)$ — закон изменения амплитуды с расстоянием вследствие расхождения волнового фронта акустических колебаний (приближенно работающее оборудование в непосредственной близости от него можно считать как источник сферических акустических колебаний с обратно пропорциональной зависимостью амплитуды от расстояния до приемника, при удалении от источника эта закономерность изменяется из-за влияния слоистости горного массива); α — коэффициент затухания, м^{-1} ; r — расстояние от источника до приемника звука, м.

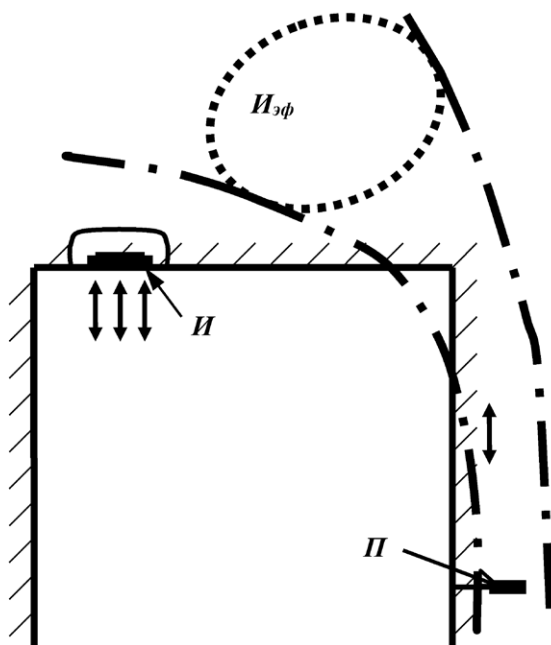


Рис. 2. Распространение звука от «эффективного источника» через лучевую трубку к приемнику

Коэффициент затухания звука зависит от частоты сигнала и напряженного состояния. Известно, что в твердом теле коэффициент α прямо пропорционален частоте сигнала f [8] и обратно пропорционален напряжениям в массиве σ [9]. Поэтому можно записать:

$$\alpha = \alpha_0 + \beta \frac{f}{f_0} \frac{\sigma_{np}}{\sigma_m}, \quad (2)$$

где α_0 — затухание на самой низкой частоте рабочего диапазона геофона при отсутствии напряжений (в разгруженном состоянии), м^{-1} ; β — параметр, который назовем динамическим коэффициентом затухания, определяемый свойствами массива, м^{-1} ; f_0 — некоторое значение частоты из рабочей области геофона, Гц; σ_{np} и σ_m — средние соответственно предельное и текущие значения напряжений в массиве, Па;

Вид выражения (2) позволяет понять физическую сущность метода спектрально-акустического контроля массива. Она состоит в следующем. При приближении забоя выработки к зоне с повышенными напряжениями влияние трещин и микротрещин уменьшается, а площадь контакта их берегов возрастает. В результате этого уменьшается затухание акустических сигналов, генерируемых режущим органом горного оборудования, на участке их прохождения до приемника. Причем затухание высокочастотных гармоник уменьшается сильнее, чем низкочастотных. Эта закономерность положена в основу данного метода контроля.

В соответствии с принципом прогноза выбросоопасности методом «по параметрам искусственного акустического сигнала» степень напряженного состояния массива будет оцениваться показателем K , равным отношению амплитуд акустических шумов от работающего горного оборудования, замеренных на высоких и низких частотах [10]:

$$K = \frac{A_B}{A_H}, \quad (3)$$

где A_B и A_H — соответственно текущие значения амплитуд, протестированных амплитудными детекторами высокочастотной и низкочастотной областей спектра, В.

В дальнейшем, поскольку показатель K определяется преимущественно напряженным состояние массива, будем называть коэффициентом относительных напряжений $K_{он}$.

Следует отметить, что поскольку спектр шума работающего горного оборудования неравномерен в области рабочих частот геодиапазонов и зависит от вида оборудования, рассматривается отношение амплитуд не фиксированных гармоник, а специальным образом выделенных низкочастотной и высокочастотной областей шумов.

Подставив выражения (1) и (2) в (3), получим:

$$K_{он} = A_0 e^{-\frac{C \sigma_{np}}{\sigma_m}}, \quad (4)$$

где $A_0 = \frac{A_{u.в}}{A_{u.н}}$; $A_{u.в}$ и $A_{u.н}$ — соответственно амплитуды высокочастотной и низкочастотной составляющих сигнала у источника, В;

$C = \frac{\beta(f_в - f_н)}{f_0}$, m^{-1} , $f_в$ и $f_н$ — средние частоты

выбранных для контроля областей соответственно верхних и нижних рабочих частот спектра излучения горного оборудования, Гц.

Из выражения (4) видно, что, во-первых, с ростом напряжений показатель напряженного состояния массива $K_{он}$ возрастает, во-вторых, подбором областей частот со средними значениями $f_в$ и $f_н$ можно регулировать чувствительность метода, в-третьих, показатель $K_{он}$ при прочих равных условиях зависит от расстояния между излучателем и приемником акустических колебаний, в-четвертых, показатель $K_{он}$ зависит от акустических свойств среды, определяющих значение коэффициента C .

ОСОБЕННОСТИ МОДИФИКАЦИЙ МЕТОДА ПРОГНОЗА «ПО ПАРАМЕТРАМ ИСКУССТВЕННОГО АКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА»

Одной из проблем в реализации этого метода является выбор рабочих частот, характеризующих низкочастотную и высокочастотную области спектра шумов работающего горного оборудования.

В настоящее время известны два подхода к определению рабочих частот [11]. Первый реализовался аппаратурой АК-1 (или ее

модификацией АК-1М) и заключается в разбиении рабочего частотного диапазона (например, 20–1500 Гц) на поддиапазоны низких и высоких частот. Разбиение осуществляется с помощью аналоговых фильтров низких и высоких частот.

Так, например, одним из предыдущих нормативных документов при использовании аппаратуры АК-1 или АК-1М регламентируется провести оценочные разведочные наблюдения для выбора частот среза фильтров высоких частот (ФВЧ) на одно из трех значений 600, 800 или 1000 Гц, и частот среза фильтров низких частот (ФНЧ) на одно из трех значений 160, 200 или 300 Гц [12] (см. рис. 3).

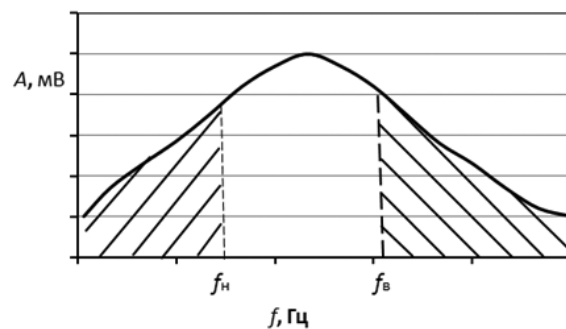


Рис. 3. Выбор низкочастотной и высокочастотной областей спектра акустического сигнала для определения показателя опасности проявления ДЯ аппаратурой АК-1: $f_н$ — частота среза ФНЧ, $f_в$ — частота среза ФВЧ

Недостаток этого подхода состоит в следующем.

1. Не используются спектральные составляющие акустического сигнала, лежащие между частотами среза ФВЧ и ФНЧ. Поэтому если изменение напряженного состояния горного массива при ведении горной выработки приведет к существенному изменению спектра акустического сигнала именно в этой области частот, оно окажется незамеченным.

2. Необходимость проведения специальных работ для выбора частот среза фильтров высоких и низких частот для конкретного участка шахты и периодической их корректировки в зависимости от изменения горногеологических и горнотехнических условий.

3. Опыт применения этого подхода показал, что невозможно установить единое

значение критической величины показателя выбросоопасности для всех шахт даже одного угольного бассейна. Поэтому критическое значение показателя выбросоопасности необходимо устанавливать экспериментально, однако методики выполнения этой процедуры нет.

Второй подход к выбору рабочих частот реализуется более совершенными цифровыми системами прогноза [12]. В соответствии с этим документом рабочий диапазон частот лежит в пределах 20–3500 Гц, а области низких и высоких частот устанавливаются следующим образом. Предполагается, что АЧХ акустического сигнала в зоне размещения приемника акустических колебаний имеет максимум.

Обработка сигнала осуществляется автоматизировано с помощью специально разработанного программного обеспечения. Определяется частота, на которой амплитуда сигнала имеет максимальное значение A_{\max} (см. рис. 4). Левее этой частоты определяют частоты, сигналы на которых имеют соответственно амплитуды, равные $0,5A_{\max}$ и $0,75A_{\max}$. Эти частоты являются граничными низкочастотной области спектра. Аналогично этому правее частоты, соответствующей A_{\max} , определяют частоты, сигналы на которых имеют соответственно амплитуды, равные $0,75A_{\max}$ и $0,5A_{\max}$. Эти частоты являются граничными высокочастотной области спектра. Коэффициент относительных напряжений в этом случае определяется по формуле:

$$K_{он} = \frac{\sum_j A_{j,в}}{\sum_i A_{i,н}}, \quad (5)$$

где $A_{j,в}$ и $A_{i,н}$ — соответственно амплитуды гармоник в высокочастотной и низкочастотной областях.

Преимущество этого подхода по сравнению с предыдущим состоит в том, что границы высоких и низких частот не являются фиксированными, а автоматически корректируются в зависимости от АЧХ принимаемого сигнала.

Но данный подход также имеет недостатки, которые состоят в следующем.

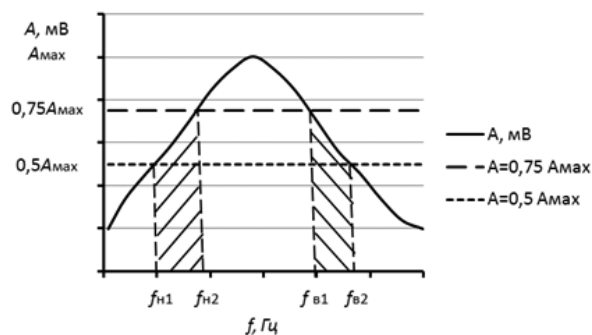


Рис. 4. Выбор низкочастотной и высокочастотной областей спектра акустического сигнала для определения показателя опасности проявления ДЯ: $(f_{н1} - f_{н2})$ — низкочастотная область, $(f_{в1} - f_{в2})$ — высокочастотная область

1. Используется не весь спектр для определения коэффициента относительных напряжений.

2. Подход предполагает, что форма АЧХ сигнала имеет явно выраженный максимум. Однако на практике регистрируются, в том числе, сигналы с формой АЧХ, имеющей колебательный характер с несколькими максимумами. Для таких случаев требуется иной алгоритм расчета $K_{он}$, например, основанный на разбиении оси частот на третьоктавные окна. Это, наряду с усреднением спектра во времени, позволяет существенно сгладить спектр сигнала.

3. Так же, как и для предыдущего подхода к выбору рабочих частот, нет методики для определения истинного критического значения показателя выбросоопасности. Это значение вычисляется как среднее арифметическое по 30 циклам проходки на неопасном участке, увеличенное на величину, определяемую среднеквадратичным отклонением от среднего значения.

Таким образом, одним из существенных недостатков рассмотренных методов определения рабочих частот метода прогноза является не использование всего спектра полезного сигнала. Многочисленные экспериментальные данные показывают, что из-за разнообразия горно-геологических условий разработки угольных пластов перед внезапными выбросами подъем АЧХ наблюдался на разных частотах (см., например, [14]). Это

может привести к тому, что возникшее изменение напряженного состояния впереди выработки приведет к существенным изменениям спектра сигнала именно в той области спектра, которая находится вне установленных низкочастотном и высокочастотном поддиапазонах частот.

Для устранения этого недостатка нами была обоснована модификация метода «по параметрам искусственного акустического сигнала», использующего весь непрерывный спектр акустического сигнала работающего оборудования в диапазоне, например, 20–1000 Гц. Использование более высоких частот может снизить глубину чувствительности метода впереди подготовительной выработки, определяемой минимальной длиной волны в спектре зондирующего сигнала, фронт волны которого определяется согласно принципу Гюйгенса [7].

Обоснование проведем в соответствии с алгоритмом, предложенным в [15], но с более высокой точностью. Предположим, что после оцифровки аналогового зондирующего сигнала и быстрого преобразования Фурье имеем спектр из N гармоник. Амплитуду i -ой гармоники на расстоянии r от источника можно записать следующим образом:

$$A_i(r) = A_{i,0} F(r) e^{-\alpha_i r}, \quad (6)$$

где $A_{i,0}$ — амплитуда i -ой гармоники у рабочего органа комбайна; α_i — затухание i -й гармоники.

Допустим, что интервал между соседними гармониками Δf равен, например, 20 Гц. Тогда частота i -ой гармоники будет равна:

$$f_i = 20i, \quad i \in [1; 50], \quad (7)$$

В первом приближении коэффициент затухания α_i по аналогии с (2) можно записать следующим образом:

$$\alpha_i = \alpha_0 + \beta_i \frac{f_i}{f_0} \frac{\sigma_{np}}{\sigma_m}, \quad \text{м}^{-1} \quad (8)$$

где β_i — назовем динамическим коэффициентом затухания i -й гармоники.

Определить значения β_i экспериментально довольно сложно. Поэтому с целью упрощения

задачи предположим, что $\beta_i \equiv \beta = \text{const}$ для данной области призабойного пространства.

Подставив (7) и (8) в (6), получим следующее выражение для i -й гармоники сигнала:

$$A_i(r) = e^{-\alpha_0 r} F(r) A_{i,0} e^{-\frac{\beta 20i \sigma_{np} r}{f_0 \sigma_m}}, \quad (9)$$

Предположим, что АЧХ акустического сигнала у источника имеет максимум в районе 14-й гармоники ($f = 280$ Гц) и ее компоненты у излучателя могут быть описаны двумя экспоненциальными функциями (возрастающей и убывающей) в следующем виде:

$$A_{i,0} = \begin{cases} A_{1,0} e^{+\xi i}, & i \in [1, 14] \\ A_{14,0} e^{-\eta(i-14)}, & i \in [15, 50] \end{cases}, \quad (10)$$

где ξ и η — показатели соответственно возрастающей и убывающей экспонент.

Амплитуды 1-й, 14-й и 50-й гармоник зададим следующим образом: $A_{1,0} = 1$ у.е., $A_{14,0} = 10$ у.е., $A_{50,0} = 0,1$ у.е. Подставив эти значения в (10), получим численные значения параметров $\xi = 0,1645$ и $\eta = 0,1279$. Спектр сигнала «шума» комбайна при этих условиях показан на рис. 5.

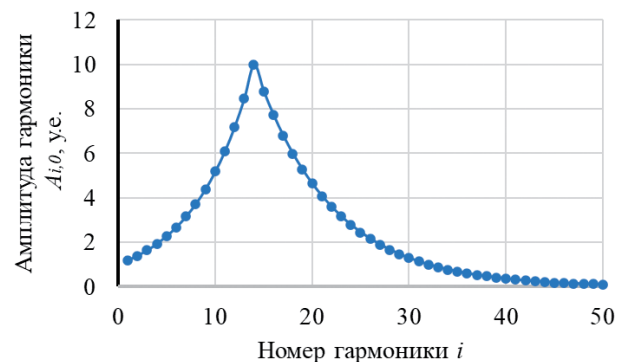


Рис. 5. Спектр шума комбайна непосредственно у источника

Покажем, как изменяется спектр этого сигнала по мере удаления геофона от источника и с увеличением напряженного состояния в соответствии с (9). Изменение напряженного состояния будем характеризовать параметром θ :

$$\theta = \frac{\sigma_m}{\sigma_{np}}. \quad (11)$$

В качестве основного параметра, характеризующего изменение спектра, будем использовать медианную частоту спектра f_m (далее ее будем называть медианой), а номер соответствующей гармоники обозначим n_m . При этом в соответствии с определением под медианой будем понимать корень уравнения $\sum_{i=1}^{i=n_m} A_i(r) = 0,5A(r)$, иначе говоря, медиана, это такая частота (или номер такой гармоники), при которой сумма амплитуд гармоник левее ее равна сумме амплитуд гармоник, расположенных в спектре правее ее. В нашем случае n_m — это номер гармоники частотой f_m , при которой выполняется условие:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{n_m-1} A_{i0} e^{-\frac{\beta 20i \sigma_{np,r}}{f_0 \sigma_m}} \leq 0,5 \sum_{i=1}^{50} A_{i0} e^{-\frac{\beta 20i \sigma_{np,r}}{f_0 \sigma_m}}, \\ \sum_{i=n_m}^{50} A_{i0} e^{-\frac{\beta 20i \sigma_{np,r}}{f_0 \sigma_m}} \geq 0,5 \sum_{i=1}^{50} A_{i0} e^{-\frac{\beta 20i \sigma_{np,r}}{f_0 \sigma_m}}. \end{cases} \quad (12)$$

В этом выражении используются знаки \leq и \geq , потому что полусумма амплитуд гармоник может быть равна значению, находящемуся между суммами амплитуд для двух соседних гармоник. В этом случае в качестве медианной выбираем гармонику, сумма амплитуд до которой от первой несколько больше полусуммы всех гармоник.

Для расчета спектра шума в соответствии с (9) необходимо знать коэффициенты затухания α_0 и β , а также параметр $F(r)$, характеризующий диаграмму направленности источника шума. Определим их.

Выполненные экспериментальные исследования на одной из шахт Кузбасса показали, что коэффициент затухания гармоник сигнала шума комбайна при удалении геофона от него на расстояние 10–50 м сильно изменяется. Приблизительно на частоте 20 Гц (1-я гармоника) среднюю величину его для конкретных условий можно взять равным $\alpha_0 = 0,04 \text{ м}^{-1}$.

Функция $F(r)$ в непосредственной близости от рабочего органа комбайна близка к $1/r$. Однако при распространении звука далее до геофона вдоль пласта, являющегося каналом с постоянным сечением, акустическую волну

весьма приближенно можно принять плоской. При этом допущении $F(r) = 1$.

Коэффициент β зависит от многих причин: мощности угольного пласта и включающих его слоев почвы и кровли, трещиноватости и пористости угля и т. д. Проведем численный эксперимент с тремя возможными значениями этого коэффициента: для слабого, среднего и сильного затухания сигнала с увеличением частоты. Для этого допустим, что при отношении $\sigma_{np}/\sigma_m = 5$, $f_0 = 20$ Гц изменение частоты с 20 до 1000 Гц приведет к возрастанию в (8) второго слагаемого по отношению к первому соответственно в 2, 5 и 10 раз. При этих условиях из (8) находим, что коэффициенты β_1 , β_2 и β_3 будут равны соответственно 0,00032, 0,0008 и 0,0016 м^{-1} .

При указанных условиях при $r = 10$ м, $\theta = 0,2$ спектр сигнала, рассчитанный в соответствии с выражениями (9) и (10) для трех значений коэффициента β , имеет вид, приведенный на рис. 6.

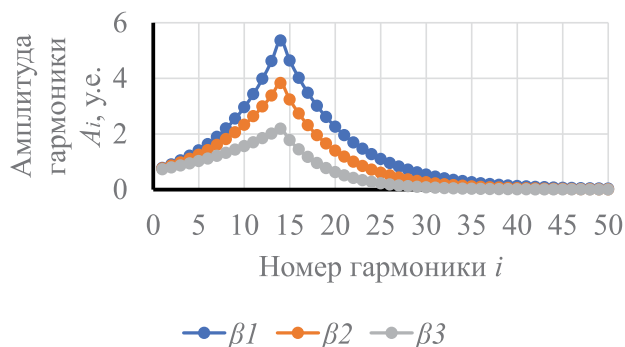


Рис. 6. Зависимость спектра шума комбайна от динамического коэффициента затухания β

Расчет в соответствии с (12) показал, что с увеличением динамического коэффициента затухания высокочастотные гармоники спектра затухают сильнее низкочастотных. При этом номера медианных гармоник n_m для β_1 , β_2 и β_3 будут соответственно равны 14, 13 и 12, что соответствует частотам 280, 260 и 240 Гц.

На рис. 7 приведены аналогичные графики спектров, рассчитанные при $\theta = 0,2$ для трех указанных значений динамического коэффициента затухания и трех значений расстояния между источником «шума» и геофоном r_1 , r_2 и r_3 , равных соответственно 10, 20 и 30 м.

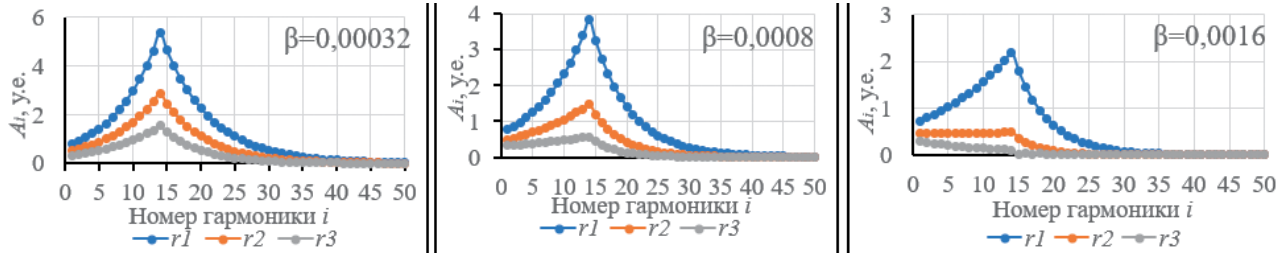


Рис. 7. Зависимость спектра шума комбайна от расстояния между источником и приемником «шума» r и динамического коэффициента затухания β

Соответствующие изменения медианной частоты приведено в табл. 1.

Как видно из таблицы, при отношении средних значений текущих и предельных напряжений $\theta = 0,2$ увеличение расстояния r от 10 до 30 м сопровождается уменьшением медианной частоты f_m для значений β_1, β_2 и β_3 соответственно на 8; 20 и 100 %.

На рис. 8 приведены графики зависимости спектра шума комбайна от отношения средних текущих и предельных напряжений θ и динамического коэффициента затухания β , рассчитанные в соответствии с (9) и (10) для случая $r = 20$ м. Соответствующие изменения медианной частоты приведено в табл. 2.

Как видно из таблицы, при рассмотренной модели акустического сигнала, имитирующего шум работающего комбайна, удаление от него геофона на расстояние $r = 20$ м и увеличение отношения средних текущих и предельных напряжений θ от 0,2 до 1,0 сопровождается увеличением медианной частоты f_m для значений динамического коэффициента затухания β_1, β_2 и β_3 соответственно на 15,4; 16,7 и 44,4 %.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что для данной модификации метода прогноза текущее значение коэффициента

относительных напряжений $K_{он,t}$ можно представить в виде отношения текущего значения медианы $f_{m,t}$ к опорному $f_{m,0}$:

$$K_{он,t} = f_{m,t} / f_{m,0}, \quad (13)$$

Здесь в качестве опорного значения медианы можно взять ее предельное значение, соответствующее равенству средних текущих и предельных напряжений $\sigma_t = \sigma_{пр}$. Для реализации такого подхода необходимо разработать методику определения $f_{m,0}$ для конкретного участка шахтопласта.

Выполненный анализ особенностей модификаций метода прогноза «по параметрам искусственного акустического сигнала» свидетельствует о следующем. Существенным их недостатком является то, что они контролируют преимущественно напряженное состояние горного массива, практически никак не реагируя на изменения внутрипластового давления газа [16]. По этой причине ряд исследователей совершенно справедливо называют показатель опасности в форме отношения амплитуд высокочастотной и низкочастотной областей спектра сигнала коэффициентом относительных напряжений [17]. В связи с этим при использовании этого метода для прогноза выбросоопасности с учетом

Таблица 1

Значения медианы спектра при изменении расстояния между источником и приемником «шума» r и динамического коэффициента затухания β

	$\beta_1 = 0,00032 \text{ м}^{-1}$		$\beta_2 = 000,8 \text{ м}^{-1}$		$\beta_3 = 0,0016 \text{ м}^{-1}$	
	n_m	$F_m, \text{ Гц}$	n_m	$F_m, \text{ Гц}$	n_m	$F_m, \text{ Гц}$
$r_1 = 10 \text{ м}$	14	280	12	240	12	240
$r_2 = 20 \text{ м}$	13	260	11	220	9	180
$r_3 = 30 \text{ м}$	13	260	10	200	6	120
Изменение $f_m, \%$	8		20		100	

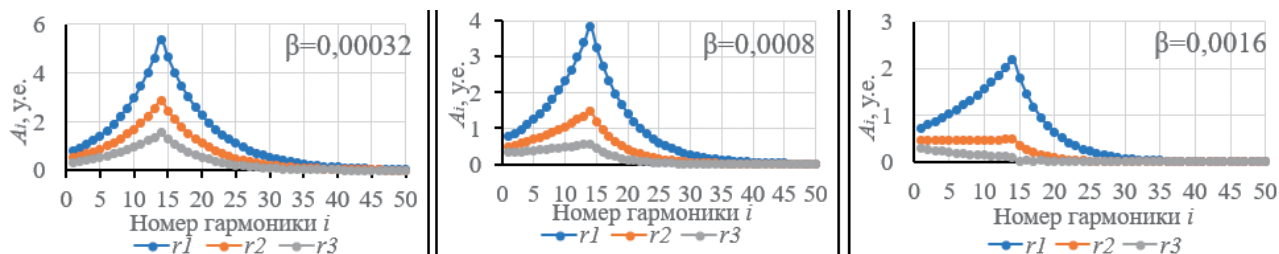


Рис 8. Зависимость спектра шума комбайна от отношения средних текущих и предельных напряжений θ и динамического коэффициента затухания β

Таблица 2

Значения медианы спектра при изменении средних текущих и предельных напряжений θ и динамического коэффициента затухания β

	$\beta_1 = 0,00032 \text{ м}^{-1}$		$\beta_2 = 000,8 \text{ м}^{-1}$		$\beta_3 = 0,0016 \text{ м}^{-1}$	
	n_M	$F_M, \text{ Гц}$	n_M	$F_M, \text{ Гц}$	n_M	$F_M, \text{ Гц}$
$\theta=0,2$	13	260	12	240	9	180
$\theta=0,5$	14	280	13	260	12	240
$\theta=1,0$	15	300	14	280	13	260
Изменение $f_M, \%$	15,4		16,7		44,4	

других факторов выбросоопасности идут по одному из двух путей.

По первому пути для того, чтобы скомпенсировать отсутствие учета давления газа и прочности перемятых угольных пачек в пласте, в качестве критического выбирают такое максимальное значение отношения амплитуд высокочастотной и низкочастотной частей спектра акустических колебаний $K_{кр}$, которое несколько ниже самого малого значения, из когда-либо замеренных перед внезапным выбросом угля и газа. Так, например, при использовании аппаратуры АК-1 нормативным документом регламентировалось устанавливать $K_{кр} = 3$ [18]. Нечувствительность данного способа прогноза к газовому фактору выбросоопасности и наличию перемятых (с низкой прочностью) пачек угля определяют завышенный «запас надежности» этого способа прогноза и, как следствие, недостаточную точность (достоверность) и экономическую эффективность.

Согласно второму пути, разрабатывают способы и реализующие их многофункциональные системы, в которых критическое значение показателя выбросоопасности при прогнозе методом «по параметрам искусственного акустического сигнала» корректируют путем учета газового фактора и прочности угля [19].

Такой метод прогноза, объединяющий контроль горного массива методом «по параметрам искусственного акустического сигнала», газоаналитическим методом (аппаратурой аэрогазового контроля) и периодическое измерение прочности угля прочностномером будем называть спектрально-акустическим.

Таким образом, спектрально-акустический метод прогноза выбросоопасности и других типов динамических явлений целесообразно использовать в составе многофункциональных систем шахты, в которых реализована подсистема контроля коэффициента относительных напряжений и подсистема аэрогазового контроля. Однако для повышения достоверности прогноза необходимо разработать методику для определения критического значения показателя выбросоопасности, более совершенную, чем предложенная в нормативных документах [3].

Выводы

1. Метод прогноза ДЯ «по параметрам искусственного акустического сигнала» во всех известных модификациях контролирует преимущественно напряженное состояние массива (коэффициент относительных напряжений $K_{он}$), обусловленное горным

давлением, и никак не контролирует газовый фактор опасности.

2. В шахтных условиях применяются два варианта определения $K_{он}$ в форме отношения высокочастотной и низкочастотной компонент спектра «шума» работающего оборудования. В первом варианте границы низкочастотной и высокочастотной областей спектра устанавливаются фиксированными, на основе предварительных исследований на конкретном участке шахтопласта. Во втором варианте высокочастотная и низкочастотная рабочие области спектра определяются автоматически соответственно правее и левее частоты с максимальной амплитудой A_{max} . При этом обе области лежат между спектральными составляющими, соответствующими амплитудам в 0,75 и 0,5 величине A_{max} . При разбиении оси частот на треть октавные окна в качестве высокочастотной части спектра используется весь спектр, расположенный правее частоты с A_{max} [3].

3. Вариант метода прогноза, основанный на зависимости медианы спектра «шума» работающего оборудования от напряжений, использует весь спектр сигнала, поэтому исключается ошибка прогноза из-за потери информации в неконтролируемой части спектра. Однако выполненные эксперименты на одной из шахт Кузбасса [15], показали, что чувствительность его меньше других вариантов исполнения этого метода прогноза.

4. Для контроля трех основных факторов опасности проявления ДЯ предлагается использовать комбинацию методов контроля напряженного состояния горного массива: горное давление контролировать методом «по параметрам искусственного акустического сигнала», газовый фактор — аппаратурой АГК (назовем его газоаналитическим методом) и прочность угля периодически измерять прочностномером, пока не разработан оперативный геофизический метод для ее непрерывного измерения. Данный метод прогноза будем в дальнейшем называть спектрально-акустическим.

5. Спектрально-акустический метод может использовать метод прогноза, основанный на анализе спектра «шума» работающего оборудования как в форме отношения амплитуд высокочастотной и низкочастотной компонент, так и в форме медианы спектра.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» проект FWEZ-2021-0001 «Создание многофункциональных систем мониторинга и прогноза газодинамических явлений, контроля напряженного состояния, разработка методов их предотвращения и оценки эффективности при подземной разработке угольных месторождений» (рег. № АААА-А21-121012290020-4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мирер С. В., Хмара О. И., Масленников Е. В. О контроле выбросоопасности забоев по спектральным характеристикам акустических сигналов // Вопросы предотвращения внезапных выбросов. Научн. сообщ. ИГД им. А.А. Скочинского. 1987. С. 52–61.
2. Король В. И., Скобенко А. В. Акустический способ прогноза газодинамических явлений в угольных шахтах. Днепропетровск, 2013. 181 с.
3. Инструкция по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений: федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности. М., 2021. Сер. 05. Вып. 49. 128 с.
4. Савич А. И. О зоне «захвата» упругих волн // Труды Гидропроекта. 1971. № 21. С. 29–40.
5. Крауткремер Й., Крауткремер Г. Ультразвуковой контроль материалов. М., 1991. 752 с.
6. 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.
7. Шадрин А. В., Контримас А. А. Задачи совершенствования спектрально-акустического прогноза динамических явлений в угольных шахтах // Научно-технологические разработки и использования минеральных ресурсов. Новокузнецк, 2017. № 3. С. 408–413.

8. Ноздрев В. Ф. Молекулярная акустика. М., 1974. 288 с.
9. Новик Г. Я., Ржевская С. В. Физико-техническое обеспечение горного производства. М., 1995. 256 с.
10. Мирер С. В. Об акустическом контроле напряженности краевой части выбросоопасного пласта // Труды ВНИМИ. 1976. № 102. С. 34–38.
11. Шадрин А. В. Особенности модификаций спектрально-акустического прогноза динамических явлений в угольных шахтах // 50 лет Российской научной школе комплексного освоения недр Земли. Материалы Международной научно-практической конференции. 13–16 ноября 2017. М., 2017. С. 85–89.
12. Руководство по выполнению спектрально-акустического контроля (прогноза) выбросоопасности на шахтах Кузбасса. Утверждено Кузнецким управлением Ростехнадзора России 23.04.2002 г. // Кемерово, 2002. 10 с.
13. Руководство по применению системы акустического контроля состояния массива горных пород и прогноза динамических явлений (САКСМ). М., 2016. 49 с.
14. Мирер С. В., Хмара О. И., Шадрин А. В. Спектрально-акустический прогноз выбросоопасности угольных пластов. М. — Кемерово, 1999. 92 с.
15. Шадрин А. В., Контримас А. А., Телегуз А. С. Сравнительный анализ вариантов исполнения спектрально-акустического метода прогноза динамических явлений // Научно-технические разработки и использования минеральных ресурсов. Новокузнецк, 2018. № 4. С. 370–375.
16. Shadrin A. V. Geophysical criterion of pre-outburst crack propagation in coal beds // Journal of Mining Science. 2016. Vol. 52. Issue 4. P. 670–682.
17. Копылов К. Н., Смирнов О. В., Кулик А. И., Пальцев А. И. Автоматизированная система контроля состояния массива горных пород и прогноза динамических явлений // Безопасность труда в промышленности. 2015. № 8. С. 32–37.
18. Предупреждение газодинамических явлений в угольных шахтах (Сборник документов). М., 2000. С. 165–168.
19. Шадрин А. В., Бирева Ю. А. Требования к подсистеме контроля внезапных выбросов угля и газа многофункциональной системы безопасности угольных предприятий // Научно-технические разработки и использования минеральных ресурсов. Новокузнецк, 2015. С. 105–110.

DOI: 10.25558/VOSTNII.2024.76.26.001

UDC 622.831.322

© A. V. Shadrin, 2024

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

ESSENCE OF COAL EMISSION HAZARD PREDICTION METHODS BASED ON SPECTRAL ANALYSIS OF «NOISE» OF OPERATING EQUIPMENT

The essence of the forecast of the dynamic phenomena on the basis of the spectral analysis of «noise» of the working mountain equipment is stated. The emission hazard is quantified by the coefficient of relative stresses determined through the parameters of the «noise» spectrum. The advantages and disadvantages of three algorithms for determining the coefficient of relative stresses are considered.

Keywords: COAL SEAM, PREPARATION PRODUCTION, EMISSION HAZARD, METHODS OF CURRENT FORECAST, SPECTRUM OF «NOISE» OF OPERATING EQUIPMENT.

REFERENCES

1. Mirer S. V., Khmara O. I., Maslennikov E. V. On the control of the emission hazard of stopes by spectral characteristics of acoustic signals // Issues of prevention of sudden emissions [Voprosy predotvrashcheniya vnezapnykh vybrosov]. 1987. P. 52–61. [In Russ.].
2. Korol V. I., Skobenko A. V. Acoustic method of forecasting gas dynamic phenomena in coal mines. Dnepropetrovsk, 2013. 181 p. [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. M., 2021. Ser. 05. Issue 49. 128 p. [In Russ.].
4. Savich A. I. On the «capture» zone of elastic waves // Proceedings of the Hydroproject [Trudy Gidroyekta]. 1971. No. 21. P. 29–40. [In Russ.].
5. Krautkremer J., Krautkremer G. Ultrasonic control of materials. M., 1991. 752 p. [In Russ.].
6. Shadrin A. V., Degtyareva M. V. Acoustic two-frequency method for monitoring the stress state of a mountain range // Bulletin of the Scientific Center for the Safety of work in the coal industry [Vestnik Nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoy promyshlennosti]. 2013. No. 1.2. P. 55–59. [In Russ.].
7. Shadrin A. V., Kontrimas A. A. The tasks of improving the spectral-acoustic prediction of dynamic phenomena in coal mines // High-tech technologies for the development and use of mineral resources [Naukoyemkiye tekhnologii razrabotki i ispolzovaniya mineralnykh resursov]. Novokuznetsk, 2017. No. 3. P. 408–413. [In Russ.].
8. Nozdrev V. F. Molecular acoustics. M., 1974. 288 p. [In Russ.].
9. Novik G. Ya., Rzhetskaya S. V. Physical and technical support of mining production. M., 1995. 256 p. [In Russ.].
10. Mirer S. V. On acoustic control of the tension of the marginal part of an explosive formation // Proceedings of VNIMI [Trudy VNIMI]. 1976. No. 102. P. 34–38. [In Russ.].
11. Shadrin A. V. Features of modifications of spectral-acoustic prediction of dynamic phenomena in coal mines // 50 years of the Russian Scientific School of integrated development of the Earth's interior. Materials of the International Scientific and Practical Conference. November 13–16, 2017 [50 let Rossiyskoy nauchnoy shkole kompleksnogo osvoyeniya nedr Zemli. Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. 13–16 noyabrya 2017]. Moscow, 2017. P. 85–89. [In Russ.].
12. Guidelines for the implementation of spectral and acoustic control (forecast) of emission hazards at Kuzbass mines. Approved by the Kuznetsk Department of Gosgortekhnadzor of Russia on 04/23/2002 // Kemerovo, 2002. 10 p. [In Russ.].
13. Guidelines for the use of a system for acoustic monitoring of the state of a rock mass and forecasting dynamic phenomena (SAKSM). M., 2016. 49 p. [In Russ.].
14. Mirer S. V., Khmara O. I., Shadrin A. V. Spectral and acoustic forecast of coal seam emissions. M. – Kemerovo, 1999. 92 p. [In Russ.].
15. 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 [Naukoyemkiye tekhnologii razrabotki i ispolzovaniya mineralnykh resursov]. Novokuznetsk, 2018. No. 4. P. 370–375. [In Russ.].
16. Shadrin A. V. Geophysical criterion of pre-outburst crack propagation in coal beds // Journal of Mining Science. 2016. Vol. 52. Issue 4. P. 670–682.
17. Kopylov K. N., Smirnov O. V., Kulik A. I., Finger A. I. Automated system for monitoring the state of a rock mass and forecasting dynamic phenomena // Occupational safety in industry [Bezopasnost truda v promyshlennosti]. 2015. No. 8. P. 32–37. [In Russ.].
18. Prevention of gas dynamic phenomena in coal mines (Collection of documents). M., 2000. P. 165–168. [In Russ.].
19. Shadrin A. V., Bireva Yu. A. Requirements for the subsystem of control of sudden emissions of coal and gas of the multifunctional safety system of coal enterprises // High-tech technologies for the development and use of mineral resources [Naukoyemkiye tekhnologii razrabotki i ispolzovaniya mineralnykh resursov]. Novokuznetsk, 2015. P. 105–110. [In Russ.].