

УДК 622.831.322

**ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ ПРЕДВЫБРОСНОГО РАЗВИТИЯ  
ТРЕЩИН В УГОЛЬНОМ ПЛАСТЕ**

**А. В. Шадрин**

*Кемеровский государственный университет, E-mail: ashadr1951@mail.ru,  
ул. Красная, 6, 650043, г. Кемерово, Россия*

Рассматривается процесс развития трещин в призабойном пространстве в качестве одного из информативных признаков опасности проявления внезапного выброса угля и газа. В известном условии роста трещины, находящейся на некотором расстоянии от забоя, основные механические параметры предлагается выразить через геофизические путем их оценки следующим образом: действующие напряжения — спектрально-акустическим методом по отношению амплитуд высокочастотной и низкочастотной составляющих акустического сигнала, генерируемого в призабойное пространство работающим горным оборудованием; внутривластовое давление газа — газоаналитическим методом по концентрации метана в атмосфере выработки; прочность наиболее перемятой пачки угля — прочностномером по глубине внедрения стального конуса. Анализируется влияние акустических, прочностных, фильтрационно-коллекторских свойств призабойного пространства на предельное значение полученного геофизического критерия предвыбросного развития трещин.

*Показатель выбросоопасности, критерий развития трещин, спектрально-акустический метод, аппаратура аэрогазового контроля, напряженное состояние, прочностные характеристики угля, внутривластовое давление газа, концентрация метана*

По данным Научного центра Восточного научно-исследовательского института по безопасности работ в горной промышленности (г. Кемерово) при ведении горных работ на участках пластов, отнесенных зональным прогнозом к выбросоопасным, протяженность выработок, действительно опасных по проявлению всей совокупности газодинамических явлений, составляет лишь 20 % от их общей длины. Протяженность же опасных по собственно внезапным выбросам угля и газа выработок равна лишь 5 % от их суммарной длины [1]. Общая площадь выбросоопасных зон на выбросоопасном по своей категории угольном пласте не превышает 10 % от всей площади пласта [2]. Поскольку применение основного в настоящее время локального способа борьбы с выбросами — бурения разгрузочных скважин — примерно на 30 % увеличивает себестоимость горных работ, велика значимость достоверности текущего прогноза выбросоопасности.

---

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках федеральной целевой программы “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы” по теме “Разработка экспериментальных конструкций комбинированного инструмента с применением сверхтвердых композиционных материалов для эффективного разрушения горных пород”, Соглашение № 14.607.21.0028 от 05.06.2014 г., уникальный идентификатор RFMEFI60714X0028).

Достоверность способа прогноза тем выше, чем точнее учитываются основные влияющие на выбросоопасность факторы. Анализ известных моделей развития внезапных выбросов свидетельствует о том, что основными факторами выбросоопасности пластов с влажностью менее 5–6 % являются горное давление, газоносность и давление свободного газа в трещинах и порах угля, а также его прочность. Если же влажность угля превышает 6 %, то выбросы никогда не происходят, так как жидкость блокирует газ в микропорах, а уголь становится настолько пластичным, что зона повышенного горного давления плавно отодвигается далеко в глубину массива, исключая условия развязывания выброса [3].

Ранее из применяемых на шахтах Востока России методов текущего прогноза выбросоопасности лучшую достоверность обеспечивал метод, основанный на измерении начальной скорости газовыделения и выхода буровой мелочи при поинтервальном бурении разведочных шпуров [3]. При этом начальная скорость газовыделения характеризовала газовый фактор выбросоопасности, а выход буровой мелочи — горное давление и прочность угля. Однако этот метод отличался большой продолжительностью и в очистных выработках не применялся; прогноз осуществлялся в остановленном забое, когда выбросоопасность была ниже, чем в процессе ведения горных работ; периодичность прогноза — через каждые 4 м длины выработки, что снижало скорость ведения выработок; измерение выхода буровой мелочи при ведении прогноза по увлажненному углю осуществлялось с ошибкой из-за налипания ее к буровой штанге. Поэтому от данного метода отказались и перешли к гораздо более простому и менее продолжительному, но и менее достоверному методу — оценке структуры пласта и начальной скорости газовыделения [4].

Внедрение в последние десятилетия гораздо более производительной горной техники, позволяющей вести подготовительные выработки со скоростью более 10 м/сут, привело к тому, что прогноз необходимо было выполнять не один раз в ремонтную смену, а несколько раз в сутки. Это потребовало разработки геофизических методов текущего прогноза выбросоопасности, не мешающих ведению горных работ и осуществляемых непрерывно в процессе ведения самих работ по углю.

Разработка таких методов основывалась на регистрации следующих основных явлений, предшествующих внезапному выбросу угля и газа [4]:

- повышенного давления на крепь горной выработки;
- ударов, тресков в массиве горных пород;
- шелушения забоя, выдавливания, отслаивания и высыпания угля из забоя;
- зажатия бурового инструмента, его выталкивания или втягивания в шпур;
- уменьшения прочности угля;
- повышенного газовыделения в выработку при буровых работах и отбойке угля.

В результате к настоящему времени известны три основных метода прогноза выбросоопасности: акустической эмиссии (АЭ), газоаналитический — по концентрации метана в атмосфере выработки, замеряемой аппаратурой аэрогазового контроля (АГК), и спектрально-акустический — по отношению амплитуд высоко- и низкочастотной частей спектра шумов работающего горного оборудования [5].

**Метод АЭ** основан на анализе активности акустической эмиссии (числа импульсов АЭ в единицу времени, например в 15-минутный интервал) и в случае ее аномального превышения значения, принятого за неопасное, выносится решение о наличии опасной зоны. Поскольку развитие трещин происходит под действием всех трех основных влияющих на выбросоопасность факторов: напряженного состояния, газового фактора и прочности угля, то метод можно назвать “всеобъемлюще” контролирующим. Однако аномальный рост активности АЭ может

сопровождаться как ростом вероятности выбросоопасности, так и ее снижением вследствие разгрузки краевой части пласта в результате произошедшего развития трещин. Существующие критерии выбросоопасности призабойного пространства методом АЭ такую неоднозначность ситуации дифференцировать не могут. Этим контроль методом АЭ движущегося призабойного пространства существенно отличается от контроля промышленного изделия или образца угля [6]. В последнем случае закономерность поведения АЭ качественно сохраняется: по мере роста нагрузки активность АЭ растет до некоторых пор, затем начинает снижаться и наконец происходит катастрофическое разрушение. Метод АЭ при прогнозе газодинамических явлений обладает недостаточной достоверностью и используется как предупреждающий о возможном выбросе или горном ударе преимущественно в очистных выработках, где более точные инструментальные методы прогноза, основанные на бурении разведочных скважин, не применяются из-за чрезмерно большой продолжительности.

**Газоаналитический метод** основан на наличии функциональной связи между внутрипластовым давлением газа, газоносностью и газопроницаемостью пласта, с одной стороны, и концентрацией метана в атмосфере выработки — с другой. Критерием выбросоопасности в этом методе является такая концентрация метана, которая была зарегистрирована перед выбросом, когда-либо произошедшим на данном месторождении. Данный метод контролирует только газовый фактор выбросоопасности, причем реально критериальное значение выбросоопасной концентрации метана в атмосфере выработки может быть значительно выше допустимой по условиям проветривания. Следовательно, применение этого критерия может привести к неоправданным противовыбросным мероприятиям.

**Спектрально-акустический метод** контролирует исключительно напряженное состояние. Он показал хорошие результаты на шахтах Донбасса, где на больших глубинах залегания угольных пластов и при их малой мощности основным фактором потери устойчивости призабойного пространства является именно горное давление. Несмотря на достаточно широкое применение этого метода на шахтах Донбасса, испытаниях его на шахтах Воркутинского, Карагандинского и Кузнецкого угольных бассейнов, в настоящее время нет однозначных количественных критериев выбросоопасности, пригодных для всех шахт, вне зависимости от горно-геологических и горнотехнических условий. На средних глубинах и при большой мощности пластов, как, например, в Кузбассе, газовый фактор играет такую же значительную роль в формировании опасности возникновения газодинамического явления, как и горное давление.

В проекте новой “Инструкции по прогнозу динамических явлений в угольных шахтах...” предлагается пороговое значение показателя выбросоопасности первоначально определять по параметрам “шумов” работающего оборудования на участках проводимой горной выработки, для которой другими методами установлена категория “неопасно” [7]. При этом как алгоритм определения показателя выбросоопасности, так и его пороговое значение предполагается утверждать техническим руководителем угледобывающей организации, несмотря на то, что методики их определения нет. Такая ситуация с перспективным методом автоматизированного текущего прогноза выбросоопасности обусловлена его недостаточным научным обоснованием, в частности неучетом всего комплекса основных влияющих на выбросоопасность факторов и параметров горного массива. Установить это влияние можно экспериментальным путем, однако такой подход имеет существенные недостатки. Без априорных данных о форме функциональных связей показателя выбросоопасности с параметрами массива горных пород трудно разработать методику определения в количественном выражении критериальных значений степени выбросоопасности: неопасно, угрожаемо и опасно.

Цель настоящей работы — установление приближенной функциональной зависимости порогового (предельного) значения показателя выбросоопасности спектрально-акустического метода прогноза от влияющих факторов и параметров горного массива, основные из которых можно контролировать геофизическими методами.

### ФИЗИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ РАЗВИТИЯ ТРЕЩИН КАК КРИТЕРИЙ ВЫБРОСООПАСНОСТИ

При приближении горных выработок к выбросоопасным зонам в горном массиве происходят процессы, которые могут привести к развязыванию катастрофических явлений. Выбросоопасные зоны приурочены к дизъюнктивным или пликативным нарушениям либо характеризуются изменением структуры угольного пласта из-за увеличения мощности наименее прочной пачки угля [3]. В нарушенных зонах отмечается снижение прочности угля, поэтому при приближении к указанным участкам пластов в них возникают зоны повышенного горного давления и регистрируются другие явления, предшествующие внезапному выбросу угля и газа. Установлено, что когда горная порода испытывает напряжения, сравнимые с пределом прочности материала, в ней начинают развиваться трещины [8, 9]. Следовательно, одним из критериальных признаков создания выбросоопасной ситуации является начало развития трещин в призабойном пространстве угольного пласта.

Угольный пласт имеет большое количество трещин как природного, так и эксплуатационного происхождения. Трещины составляют несколько систем, где под системой понимают трещины, ориентация которых не отличается больше чем на десять градусов [10]. В исходном напряженном состоянии определенная система трещин массива в сравнении с остальными имеет преимущества для своего развития. Вследствие этого в призабойном пространстве при приближении к зонам повышенного горного давления начинают одновременно развиваться несколько трещин, принадлежащих одной системе и имеющих некоторое среднее значение начальной длины.

В данной работе исследован процесс развития трещин на примере одной характерной трещины и получен критерий его протекания, выраженный через параметры геофизических методов контроля призабойного пространства, не мешающих ведению горных работ. Для решения поставленной задачи рассмотрена расчетная схема развития изолированной трещины с характерным размером  $2l$ , находящаяся на расстоянии  $x_{cr}$  от груди забоя [11].

Призабойная часть горного массива представлена в виде однородного полупространства, находящегося в поле напряжений  $\sigma_1(x) - \sigma_3(x)$  (случай плоского нагружения) и ослабленного трещинами, заполненными газом под давлением  $P$  (рис. 1).

Под действием сил горного и газового давления отдельные трещины, в зависимости от начальной длины, ориентации и значений вертикальной и горизонтальной компонент напряжений, могут выходить из равновесного состояния и скачкообразно расти. Не останавливаясь на вопросе о преимущественных условиях развития трещин [12], перейдем к задаче получения критерия развития трещин, выраженного через параметры геофизических методов контроля состояния горного массива.

В [11] показано, что для приведенной расчетной схемы условие роста трещин, находящихся на расстоянии  $x_{cr}$  от забоя выработки, под действием внешних сжимающих нагрузок  $\sigma_1(x) - \sigma_3(x)$  и внутреннего давления газа  $P$  имеет вид

$$\psi_{cr} \frac{P - |\sigma_3|}{\sigma_s} + \frac{|\sigma_1|}{\sigma_p} = 1, \quad (1)$$

где  $\psi_{cr}(x_{cr}/l) = k_1/k_1^\infty$ ,  $k_1$  и  $k_1^\infty$  — коэффициенты интенсивности напряжений соответственно в точке наблюдения и вне зоны влияния выработки;  $\sigma_p$  и  $\sigma_s$  — пределы прочности соответственно на сжатие и растяжение;  $\sigma_1(x)$  и  $\sigma_3(x)$  — главные напряжения.

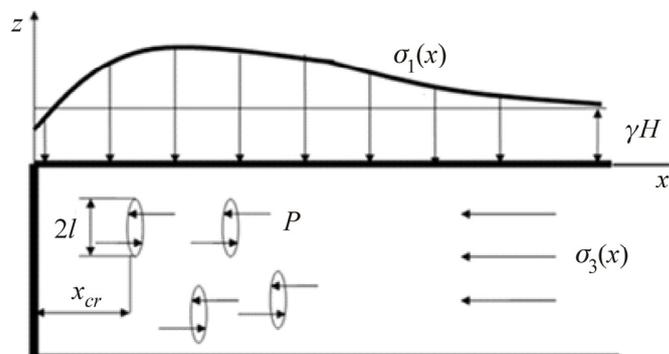


Рис. 1. Угольный пласт впереди забоя выработки в поле напряжений  $\sigma_1(x) - \sigma_3(x)$ , ослабленный трещинами, заполненными газом под давлением  $P$ :  $l$  — полудлина трещины;  $\gamma$  — удельный вес вышележащих пород;  $H$  — расстояние до земной поверхности

В выражении (1) берутся модули напряжений  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$ , поскольку сжимающие напряжения полагаются отрицательными. Пример зависимости  $\psi_{cr}$  от  $x_{cr}/l$  приведен на рис. 2 [11]. Видно, что этот параметр по мере приближения зоны пласта, в которой инициируется выброс (развивается трещина), к забою выработки и увеличения длины трещин увеличивается от значения, близкого к 1.2, до значения, превышающего 5.

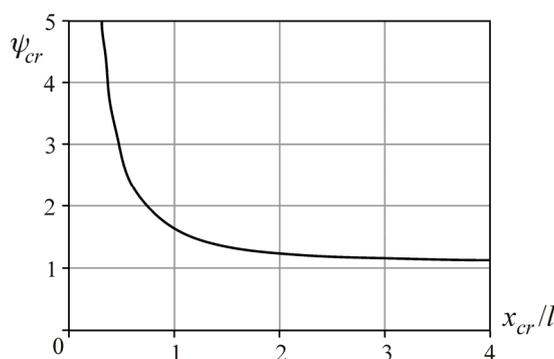


Рис. 2. Пример зависимости  $\psi_{cr}$  от  $x_{cr}/l$  [11]

Поскольку  $\sigma_3 = \lambda \sigma_1$  [13], где  $\lambda$  — коэффициент бокового распора, из (1) получаем критерий развития трещин, из которого можно определить предельные нормальные вертикальные напряжения  $|\sigma_1|_l$ , при превышении которых трещина начинает скачкообразно расти:

$$|\sigma_1|_l = \frac{\sigma_s \sigma_p}{\sigma_s - \psi_{cr} \lambda \sigma_p} - \frac{\psi_{cr} \sigma_p}{\sigma_s - \psi_{cr} \lambda \sigma_p} P. \quad (2)$$

Данное условие помимо компонент напряжений учитывает прочностные свойства пласта, а также давление газа в трещинах, их размеры и удаление от забоя выработки. Оно также косвенно учитывает начальную длину трещин (параметр  $\psi_{cr}$ ), однако не учитывает ориентацию трещины относительно компонент напряжений. Кроме того, это условие справедливо лишь для

квазистационарного состояния, поскольку влияние скорости движения выработки на величины  $x_{cr}$  и  $\psi_{cr}$  не рассматривается. Возможный подход к учету влияния скорости движения выработки на изменения напряженного состояния в призабойном пространстве и величину  $\psi_{cr}$  представлен в [14]. В данной работе для простоты решения задачи ограничимся рассмотрением квазистационарного напряженного состояния призабойного пространства и выражение (2) будем считать приближенным критерием развития трещины.

Чтобы контролировать соблюдение критерия (2) геофизическими методами, необходимо выразить входящие в него параметры через величины, которые можно быстро измерять или оценивать без остановки горных работ.

Оценка предельных прочностных характеристик угля в массиве известными прямыми методами достаточно трудоемка. Покажем наличие связи между прочностными характеристиками и прочностью угля, которую на шахтах России измеряют прочностномером П-1 конструкции ИГД им. А. А. Скочинского при осуществлении текущего прогноза выбросоопасности нормативным методом [15]. В процессе автоматизированного мониторинга выбросоопасности можно ограничиться периодическим измерением прочности наиболее перемятой пачки угля в плоскости забоя выработки, поскольку это не занимает много времени.

Воспользуемся приближенными соотношениями для определения  $\sigma_p$  и  $\sigma_s$  через коэффициент крепости по Протодяконову  $F$  [16]:  $\sigma_p = 10F$  МПа.

В отношении  $\sigma_s$  однозначной связи с коэффициентом крепости нет. Однако установлено, что между  $\sigma_p$  и  $\sigma_s$  существуют прямолинейные взаимосвязи, большинство из которых располагается в области, ограниченной следующими прямыми [16]:

$$\sigma_p = 60\sigma_s \text{ и } \sigma_p = 9\sigma_s, \quad (3)$$

причем средняя прямая описывается выражением

$$\sigma_{p,m} \approx 15\sigma_s. \quad (4)$$

Близкая к (4) функциональная зависимость для пород с  $\sigma_s \leq 5$  МПа приводится в [10]:

$$\sigma_{p,m} = 19.3\sigma_s. \quad (5)$$

Поскольку между коэффициентом крепости по Протодяконову  $F$  и коэффициентом прочности, измеренным прочностномером конструкции ИГД им. А. А. Скочинского  $q$  (измеряется в условных единицах), существует связь вида [17]:

$$F = \frac{0.4q}{110 - q}, \quad (6)$$

получаем следующие выражения, связывающие параметры  $\sigma_p$  и  $\sigma_s$  (МПа) с коэффициентом прочности  $q$ :

$$\sigma_p = \frac{4q}{110 - q}, \quad (7)$$

$$\sigma_s \approx \frac{0.3q}{110 - q}. \quad (8)$$

Подставив (7) и (8) в (2), получим

$$|\sigma_1|_l \approx \left| \frac{1.2q^2}{(110 - q)(0.3q - 4\lambda\psi_{cr}q)} - \frac{4\psi_{cr}qP}{(0.3q - 4\lambda\psi_{cr}q)} \right|. \quad (9)$$

Поскольку здесь  $0.3q \ll 4\lambda\psi_{cr}q$ , этой величиной можно пренебречь. Тогда выражение (9) преобразуется к следующему упрощенному виду:

$$|\sigma_1|_l \approx \left| \frac{0.3}{\lambda\psi_{cr}} \frac{q}{110-q} - \frac{P}{\lambda} \right|. \quad (10)$$

Таким образом, критерий выбросоопасности, в данном случае совпадающий с критерием развития трещин, оказывается выраженным через 5 неизвестных величин:  $q$ ,  $\lambda$ ,  $|\sigma_1|_l$ ,  $P$  и  $\psi_{cr}$ , из которых  $q$  легко рассчитываются по показаниям прочностномера, действие которого основано на измерении внедрения стального конуса, получающего удар пружинного механизма.

В [18] показано, что отношение предельных и текущих напряжений оценивается спектрально-акустическим методом, а пластовое давление газа — по концентрации метана у забоя выработки, регистрируемой аппаратурой аэрогазового контроля. Следовательно, для получения критерия предвыбросного развития трещин в угольном пласте, выраженного через параметры, контролируемые геофизическими методами контроля, необходимо оценить параметры  $\psi_{cr}$  и  $\lambda$ .

Вариация значений  $\psi_{cr}$ , вероятно, обусловлена особенностями строения угольного пласта и вмещающих пород, напряженным состоянием, прочностью угля, а также распределением растущих трещин разной начальной длины с различным удалением от забоя выработки по объему призабойного пространства, но в настоящее время простой методики измерения этого параметра нет. Для обоснования оценки его значений приведем следующие рассуждения. По-видимому, угроза развязывания внезапного выброса, связанная с ростом трещин, возникает первоначально вблизи зоны повышенного горного давления на удалении от забоя выработки, величина которого значительно превышает начальную длину имеющихся в пласте трещин. Поэтому отношение  $x_{cr}/l$  на начальном этапе формирования выбросоопасной ситуации можно считать относительно большой величиной и предположить, что параметр  $\psi_{cr}$  на расстоянии  $x_{cr}$  от забоя выработки стремится к своему минимальному значению, т. е.  $\psi_{cr} \approx 1.2$ , а при приближении к забою плоскости, в которой инициируется развязывание выброса, возрастает до  $\psi_{cr} \gtrsim 5$  (см. рис. 2).

В [13, 19–21] приводятся функциональные зависимости, связывающие параметр  $\lambda$  с прочностью угля. Однако они справедливы только для частных случаев различных типов горных пород, так как при их использовании всей возможной области значений прочности угля соответствуют небольшие области значений параметра  $\lambda$ , значительно меньшие измеренных в реальных условиях. В дальнейшем будем принимать во внимание всю возможную область значений этого параметра.

#### ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ РАЗВИТИЯ ТРЕЩИН КАК КРИТЕРИЙ ВЫБРОСООПАСНОСТИ

В работе [22] показано, что спектрально-акустический метод прогноза выбросоопасности контролирует лишь напряженное состояние горного массива и практически не отражает давление газа в пласте. В этом методе текущее значение показателя выбросоопасности  $K_c$  оценивается отношением амплитуд акустических шумов от работающего горного оборудования, прошедших контролируемую зону массива и замеренных соответственно на высоких и низких частотах. Количественное значение этого показателя зависит от трех основных параметров: свойств контролируемого массива (определяющих коэффициент затухания звука); выбора граничных значений частот, соответствующих низкочастотной и высокочастотной областям, а также масштабного коэффициента, который вводится для удобства градации степени выбросоопасности. Так, например при использовании аппаратуры АК-1 области значений высоких и

низких частот и масштабный коэффициент выбирались такими, чтобы в неопасной зоне  $K_c \approx 1$ , а при  $K_c \geq 3$  зона пласта относилась к выбросоопасной. При этом показатель  $K_c$  связан с напряженным состоянием массива [22] следующим образом:

$$K_c = \frac{A_h}{A_l} = e^{-C \frac{\sigma_l}{\sigma_c} d}, \quad (11)$$

где  $A_h$ ,  $A_l$  — амплитуды акустических шумов, замеренных соответственно на высоких и низких частотах;  $\sigma_l$  и  $\sigma_c$  — соответственно средние предельное и текущее напряжения;

$$C = \frac{\alpha_0 \beta (f_h - f_l)}{f_0}, \quad (12)$$

$f_h$  и  $f_l$  — характерные частоты из диапазонов соответственно верхних и нижних рабочих частот источника акустического сигнала, Гц;  $\alpha_0$  — затухание на некоторой частоте  $f_0$ , принадлежащей диапазону регистрируемых частот,  $\text{м}^{-1}$ ,  $\beta$  — коэффициент пропорциональности, определяемый свойствами массива;  $d$  — расстояние между источником шума, воздействующим на забой (комбайн, отбойный молоток, буровая коронка) и приемником, установленным в борт выработки на некотором удалении от забоя, м.

При достижении текущими напряжениями предельных значений  $\sigma_c = \sigma_l$  показатель выбросоопасности  $K_c$  принимает предельное значение  $K_l$ :

$$K_l = e^{-Cd}. \quad (13)$$

Отсюда видно, что  $K_l$  зависит, во-первых, от акустических свойств массива, во-вторых, от выбранных рабочих частот (см. формулу (12)), в-третьих, экспоненциально уменьшается с увеличением расстояния между приемником и источником акустических колебаний. Указанные закономерности показаны на рис. 3. Расчет параметра  $C$  осуществлялся по формуле (12) при следующих параметрах:  $\alpha_0 = 1.3 \text{ м}^{-1}$ ,  $f_l = 300 \text{ Гц}$ ,  $f_0 = 500 \text{ Гц}$ ,  $f_h = 800 \text{ Гц}$ .

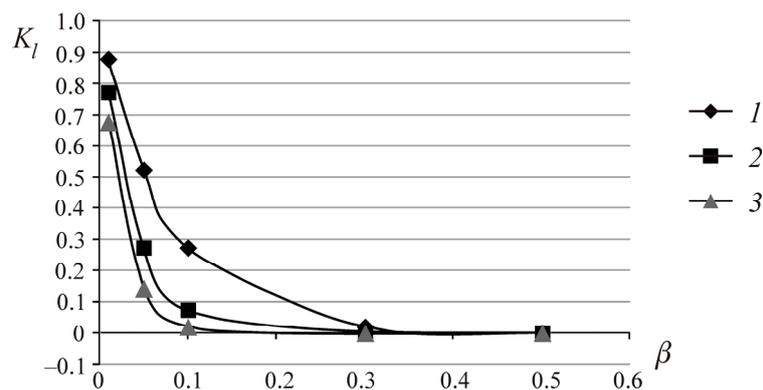


Рис. 3. Зависимость  $K_l$  от  $\beta$  при разных расстояниях  $d$  между приемником и источником акустического излучения, м: 1 — 10; 2 — 20 и 3 — 30

Таким образом, параметр  $K_l$  для каждого пласта имеет свое значение и не может устанавливаться в нормативных документах постоянным для всех угольных регионов. Методика определения коэффициента  $\beta$  и показателя  $K_l$  должна строиться на сопоставлении результатов определения показателя выбросоопасности в одних и тех же условиях двумя методами одновременно: спектрально-акустическим и инструментальным, основанным на показаниях начальной скорости

газовыделения и выхода буровой мелочи при бурении контрольного шпура. При этом показатель выбросоопасности, определенный инструментальным методом, играет роль эталона, поскольку основывается на измерении параметров, непосредственно влияющих на выбросоопасность.

При возрастании текущих напряжений показатель выбросоопасности  $K_c$  возрастает и стремится к своему предельному значению  $K_l$  в соответствии с выражением (11). Пример зависимости  $K_c$  от отношения  $\sigma_l / \sigma_c$  для значения  $K_l = 0.6$  приведен на рис. 4.

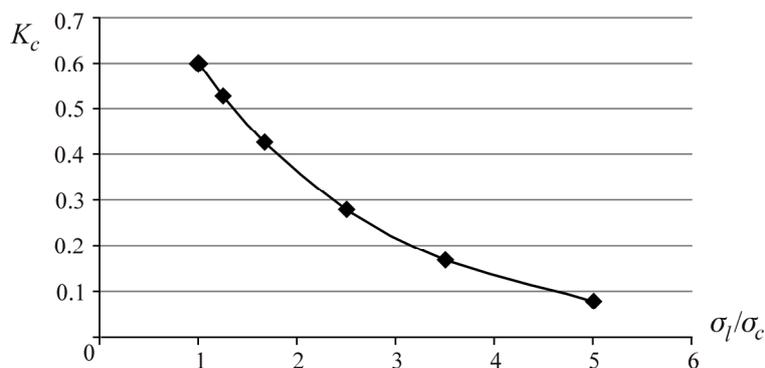


Рис. 4. Зависимость  $K_c$  от отношения  $\sigma_l / \sigma_c$  для значения  $K_l = 0.6$

В выражение (11) для определения показателя выбросоопасности  $K_c$  входит величина  $\sigma_l$  — среднее предельное напряжение:

$$|\sigma_l| = \frac{1}{3} (|\sigma_1| + |\sigma_2| + |\sigma_3|). \quad (14)$$

Поскольку впереди подготовительной выработки можно приближенно принять  $|\sigma_2| \approx |\sigma_1|$  [23],  $\sigma_l$  определится следующим образом:

$$|\sigma_l| \approx \frac{1}{3} (2|\sigma_1| + |\sigma_3|) \approx \frac{2 + \lambda}{3} |\sigma_1|. \quad (15)$$

С учетом (10) имеем

$$|\sigma_l| \approx L \left| \frac{0.3}{\psi_{cr}} \frac{q}{110 - q} - P \right|, \quad (16)$$

где  $L = (2 + \lambda) / 3\lambda$ , назовем этот параметр средним коэффициентом бокового давления.

Предельное значение  $\sigma_l$ , определенное в соответствии с (16), зависит от величин, которые могут изменяться в процессе проведения выработки; назовем это значение текущим предельным значением средних напряжений  $\sigma_l \equiv \sigma_{l,c}$ .

Оценим область значений  $L(\lambda)$ . Коэффициент бокового распора зависит от свойств угля. В прочных упругих породах он определяется через коэффициент Пуассона и может принимать значения от 0.1 до 0.5 [13]. Если помимо гравитационного поля в формировании напряженного состояния участвует и тектоническое силовое поле, то параметр  $\lambda$  может быть больше единицы. Тогда область значений параметра  $L$  будет варьировать в очень широких пределах. Зависимость  $L = L(\lambda)$  приведена на рис. 5.

Видно, что наиболее сильные изменения параметра  $L$  наблюдаются при малых значениях  $\lambda$ , характерных для призабойного пространства. Однако в рассматриваемой задаче количе-

ственное значение этого коэффициента не влияет на коэффициент выбросоопасности, так как он входит сомножителем в выражения для определения предельного и текущего значений средних напряжений, отношение которых и определяет показатель выбросоопасности.

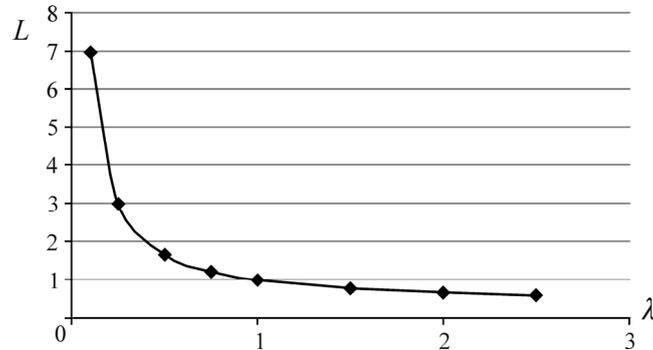


Рис. 5. Зависимость  $L$  от коэффициента бокового распора

Рассмотрим, как меняются показатели выбросоопасности  $K_c$  и  $K_l$  при изменении прочности угля и пластового давления газа при подходе к выбросоопасной зоне или выходе из нее.

Будем считать, что максимальное значение среднего предельного напряжения  $|\sigma_l|_{\max}$  достигается при максимальной прочности угля, т. е. при  $q_{\max} = 100$  у.е. и при отсутствии газа в пласте ( $P = 0$ ). В соответствии с (16) для рассматриваемой модели развития трещин и при сделанных допущениях  $\sigma_{l,\max} = |\sigma_l|_{\max} \approx 3L/\psi_{kp}$  МПа, а максимум этой величины  $|\sigma_l|_{\max,\max}$  при  $\psi_{cr} = 1.2$  равен  $\approx 2.5L$  МПа.

Тогда любое текущее значение среднего предельного напряжения  $|\sigma_l|_c$  можно записать следующим образом:

$$\sigma_{l,c} = |\sigma_l|_c = |\sigma_{l,\max} - \Delta\sigma_{l,c}|, \quad (17)$$

где  $\Delta\sigma_{l,c}$  — изменение величины  $\sigma_l$  от максимального до текущего значения при изменении прочности угля от  $q_{\max}$  до  $q$ .

Подставим (17) в (11) и получим выражение для определения текущего значения показателя выбросоопасности:

$$K_c = e^{-C \frac{\sigma_{l,\max}}{\sigma_c} \left(1 - \frac{\Delta\sigma_{l,c}}{\sigma_{l,\max}}\right) d}. \quad (18)$$

Введем обозначение:

$$C_c = C \left(1 - \frac{\Delta\sigma_{l,c}}{\sigma_{l,\max}}\right). \quad (19)$$

С учетом (16)

$$\Delta\sigma_{l,c} = |\sigma_{l,\max} - \sigma_{l,c}| = \left| L \left[ \frac{0.3}{\psi_{cr}} \frac{q}{110 - q} - P \right] - \sigma_{l,\max} \right|,$$

где  $\sigma_{l,\max} = (3L)/\psi_{cr}$ . Подставив эти значения в (19), получим

$$C_c = C \left| 2 - 0.1 \left( \frac{q}{110 - q} \right) + \frac{\psi_{cr}}{3} P \right|. \quad (20)$$

Тогда текущее предельное значение показателя выбросоопасности, которое достигается при  $\sigma_c = \sigma_{l,max}$ , составит

$$K_{l,c} = e^{-C \left| 2 - 0.1 \left( \frac{q}{110 - q} \right) + \frac{\psi_{cr}}{3} P \right| d} \quad (21)$$

Зависимость  $K_{l,c,0}$  (при  $P = 0$ ) от прочности угля  $q$  для трех значений  $\psi_{cr}$  приведена на рис. 6. Видно, что предельное значение показателя выбросоопасности при указанных для расчета параметрах с увеличением прочности угля от 45 до 95 у.е. увеличивается почти в 1.7 раза для  $\psi_{cr} = 1.2$ . Чем ближе к забою выработки, тем выше значение  $\psi_{cr}$  и тем ниже область изменений  $K_{l,c}$  при изменении прочности угля  $q$  в рассматриваемом диапазоне.

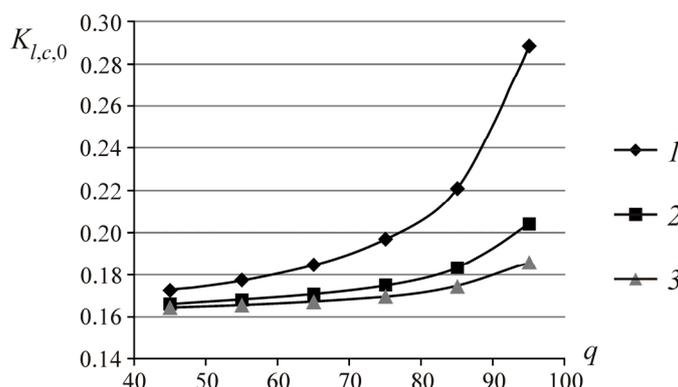


Рис. 6. Зависимость  $K_{l,c,0}$  от прочности угля  $q$  для  $\psi_{cr} = 1.2$  (1); 3.0 (2) и 5.0 (3) при условии:  $P = 0$ ;  $\alpha_0 = 1.3 \text{ м}^{-1}$ ;  $f_l = 300 \text{ Гц}$ ;  $f_0 = 500 \text{ Гц}$ ;  $f_h = 800 \text{ Гц}$ ;  $\beta = 0.07$ ;  $d = 10 \text{ м}$

На рис. 7 показаны зависимости  $K_{l,c}$  от пластового давления газа  $P$  для трех значений прочности угля, рассчитанные в соответствии с (21). Видно, что с увеличением давления газа и уменьшением прочности угля предельное значение показателя выбросоопасности снижается.

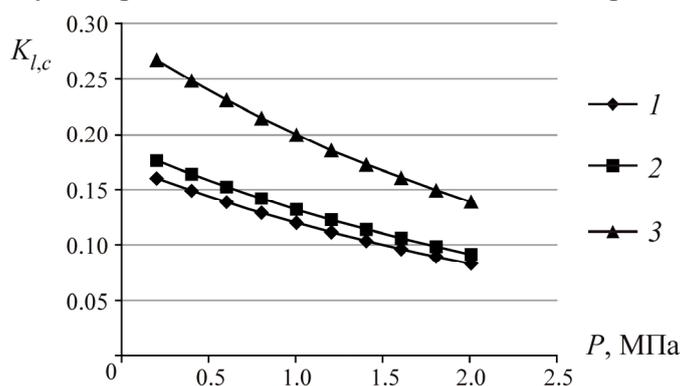


Рис. 7. Зависимость  $K_{l,c}$  от пластового давления газа  $P$  для прочности угля  $q = 45$  (1); 70 (2); 95 (3) при условии:  $\alpha_0 = 1.3 \text{ м}^{-1}$ ;  $f_l = 300 \text{ Гц}$ ;  $f_0 = 500 \text{ Гц}$ ;  $f_h = 800 \text{ Гц}$ ;  $\beta = 0.07$ ;  $\psi_{cr} = 1.2$ ;  $d = 10 \text{ м}$

Поскольку измерять пластовое давление газа непрерывно в процессе ведения горных работ невозможно, покажем, как этот параметр можно оценить по концентрации газа в атмосфере выработки вблизи забоя.

В [23] установлено, что давление газа  $P$  на расстоянии  $x$  от обнаженной поверхности выработки может быть описано следующей формулой:

$$P = m \sqrt{\frac{Gk_0}{B}} x e^{-\varphi x}, \quad (22)$$

где  $m$  — константа, обусловленная тем, что в сторону выработки действует не все давление  $P$ , а только часть его, находящегося в порах и трещинах;  $G$  — расход газа с поверхности забоя,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $k_0$  — коэффициент, характеризующий газопроницаемость пласта,  $\text{м}^{-3}$ ;  $B = \frac{S_f}{\eta P_{at}}$ ,  $S_f$  — площадь поверхности забоя выработки,  $\text{м}^2$ ,  $\eta$  — динамическая вязкость метана,  $\text{Па}\cdot\text{с}$ ;  $P_{at}$  — давление газа на плоскости забоя, равное атмосферному,  $\text{Па}$ ;  $\varphi = 1/x_{st}$  — константа, определяемая расстоянием ( $x_{st}$ ) от забоя до участка массива, где давление газа стабилизируется,  $\text{м}^{-1}$ .

Из этого соотношения видно, что при прочих равных условиях увеличение пластового давления газа должно сопровождаться ростом газовыделения в выработку. Будем использовать эту закономерность для коррекции предельного значения показателя выбросоопасности с учетом газового фактора.

Попадая в выработку, газ смешивается с воздухом, в результате текущее значение концентрации метана  $\Omega_c$  снижается. Газовыделение в выработку  $G_\Sigma$  складывается из газовыделения с поверхности забоя, бортов выработки и отбитого угля:

$$G_\Sigma = G + G_1 + G_2, \quad (23)$$

где  $G_1$  и  $G_2$  — расход газа с поверхности соответственно бортов выработки и отбитого угля,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Это газовыделение можно определить через концентрацию метана в атмосфере выработки:

$$G_\Sigma = \frac{Q\Omega_c}{100}, \quad (24)$$

здесь  $Q$  — расход воздуха вентилятора местного проветривания,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $\Omega_c$  — текущее значение концентрации метана, измеренное датчиком метана на некотором удалении от забоя, %.

Тогда

$$G = \frac{Q(\Omega_c - \Omega_f)}{100} - G_2, \quad (25)$$

где  $\Omega_f$  — фоновая концентрация метана, замеренная до начала работы комбайна и характеризующая газовыделение из бортов выработки и отбитого ранее, но не отгруженного угля, %.

Искомое давление газа на расстоянии  $x_{cr}$  от забоя выработки определится подстановкой (25) в (22):

$$P = m \sqrt{k_0 \eta P_{at}} \sqrt{\frac{1}{S_f} \left( \frac{Q(\Omega_c - \Omega_f)}{100} - G_2 \right)} x_{cr} \exp(-\varphi x_{cr}). \quad (26)$$

Таким образом, концентрация метана в выработке, замеренная аппаратурой АГК, характеризует давление газа в призабойной зоне и газопроницаемость пласта, а изменение концентрации во времени — газоносность пласта.

В этом выражении из анализа необходимо исключить поток газа, идущий из отбитого угля. Однако при протекании внезапного выброса в процессе участвует как свободный газ в трещинах, так и десорбируемый со временем с поверхностей пор и микротрещин. При оценке давления газа в массиве по концентрации метана в атмосфере выработки необходимо учитывать газ, поступающий как с поверхности забоя, так и из отбиваемого угля. Кроме того, следует учесть, что в зависимости от оборудования, оказывающего воздействие на забой и генерирующего

акустические колебания, свежееобнаженная площадь забоя составляет лишь часть его площади. Примем во внимание также то обстоятельство, что регистрировать экспериментально все входящие в выражение (26) параметры не представляется возможным. Целесообразно его упростить, введя интегральный коэффициент  $D$ , определяемый экспериментально:

$$P = D \sqrt{\frac{Q(\Omega_c - \Omega_f)}{\xi_i}}, \tag{27}$$

где  $D = m \sqrt{k_0 \eta P_{at} x_{cr}} \exp(-\varphi x_{cr}) / \sqrt{100 S_f}$ , Па·с<sup>1/2</sup> м<sup>-3/2</sup>;  $\xi_i$  — коэффициент, учитывающий степень воздействия (долю свежееобнаженной площади забоя)  $i$ -го вида оборудования (комбайн, отбойный молоток, буровой станок и диаметр коронки) на забой,  $0 < \xi_i < 1$ .

С учетом (27) выражение для определения предельного значения показателя выбросоопасности (21) примет вид

$$K_{l,c} = e^{-c \left| 2 - 0.1 \left( \frac{q}{110 - q} \right) + \frac{\psi_{cr}}{3} D \sqrt{\frac{Q(\Omega_c - \Omega_f)}{\xi_i}} \right| d}. \tag{28}$$

На рис. 8 приведены зависимости  $K_{l,c}$  от текущего значения концентрации метана  $\Omega_c$  для значений параметра  $D = 0.08 - 0.12$  Па·с<sup>1/2</sup> м<sup>-3/2</sup>, рассчитанные по формуле (28) при следующих значениях входящих в него величин:  $\alpha_0 = 1.3$  м<sup>-1</sup>;  $f_l = 300$  Гц;  $f_0 = 500$  Гц;  $f_h = 800$  Гц;  $\beta = 0.07$ ;  $\psi_{cr} = 5.0$ ;  $q = 65$  у.е.;  $\Omega_f = 0.1$  %;  $\Omega_c = 0.2 - 1.0$  %;  $Q = 10$  м<sup>3</sup>/с;  $\xi_i = 0.1$ ;  $d = 10$  м.

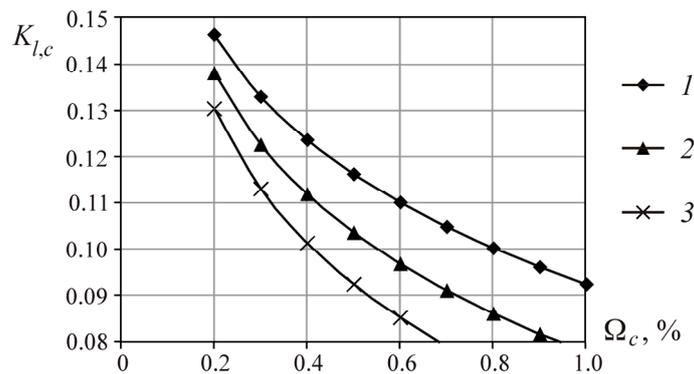


Рис. 8. Зависимость  $K_{l,c}$  от текущего значения концентрации метана  $\Omega_c$  для  $D = 0.08$  (1);  $0.10$  (2);  $0.12$  (3)

Оценка параметра  $D$  сделана исходя из следующих соображений. Угольные пласты, опасные по проявлению газодинамических явлений, можно условно отнести к трем группам: опасные по проявлению горных ударов, внезапных выбросов и одновременно горных ударов и внезапных выбросов. Первая группа характеризуется высокой прочностью угля, действующими высокими напряжениями и незначительным или умеренным давлением газа; вторая группа — низкой прочностью угля, высоким газовым давлением при достаточном среднем напряжении, которое может быть и невысоким; третья группа — средними значениями прочности угля при существенных средних напряжениях и давлении газа. Для третьей группы пластов можно предположить примерное равенство влияния на показатель выбросоопасности сил горного давления и пластового давления газа. Это возможно, если для показателя экспоненты в (28) выполняется условие

$$2 - 0.1 \left( \frac{q}{110 - q} \right) = \frac{\psi_{cr}}{3} D \sqrt{\frac{Q(\Omega_c - \Omega_f)}{\xi_i}}. \tag{29}$$

Полагаем, что при развитии трещин, предшествующих внезапному выбросу, концентрация метана приблизилась к максимально допустимой величине  $\Omega_c = 1$  %. Тогда для значений  $q = 35$ ; 65 и 95 из (29) получим соответственно  $D = 0.12$ ; 0.11 и 0.08 Па·с<sup>1/2</sup> м<sup>-3/2</sup>. Эти значения не являются характерными для всех выбросоопасных пластов, а используются для иллюстрации влияния газового фактора на предельное значение показателя выбросоопасности для тех участков угольных пластов, на которых опасность проявления газодинамического явления под действием сил горного и газового давления примерно одинакова.

Таким образом, контролируя газовый фактор аппаратурой АГК, а прочность угля — прочностным мером по наиболее перемятой пачке угля, можно постоянно корректировать предельное значение показателя выбросоопасности  $K_{l,c}$  в соответствии с выражением (28). Текущее значение показателя выбросоопасности непрерывно можно измерять спектрально-акустическим методом в соответствии с выражением (11). Сравнивая предельное и текущее значения выбросоопасности, можно судить о степени выбросоопасности горного массива.

### ВЫВОДЫ

Показано, что критическое значение показателя выбросоопасности спектрально-акустического метода прогноза зависит от ряда параметров, характеризующих акустические, горно-геологические и фильтрационно-коллекторские свойства контролируемого участка пласта, а также прочность угля и концентрацию метана в призабойном пространстве выработки. Большинство параметров сохраняется примерно постоянным вплоть до приближения к опасной зоне. При этом достаточно высокая средняя прочность угля и относительно низкая концентрация метана в атмосфере выработки позволяют принять критическое значение показателя выбросоопасности на некотором высоком уровне. При подходе к выбросоопасной зоне, которая, как правило, характеризуется снижением средней прочности угля (увеличением мощности перемятой пачки) и увеличением концентрации метана в процессе ведения горных работ по углю, критическое значение показателя выбросоопасности уменьшается. Характер этого снижения качественно описывается установленной зависимостью.

Результаты исследований могут быть использованы при разработке методики определения критического значения показателя выбросоопасности для спектрально-акустического метода прогноза.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кнуренко В. А., Рудаков В. А., Егоров П. В., Сурков А. В. Региональный прогноз выбросоопасности угольных пластов Кузбасса / Академия горных наук. — Кемерово, 1997. — 119 с.
2. Зыков В. С., Егоров П. В., Потапов П. В. и др. Прогноз и предотвращение внезапных выбросов угля и газа в очистных забоях угольных шахт. — Кемерово: Кузбассвуиздат, 2003. — 198 с.
3. Чернов О. И., Пузырев В. Н. Прогноз внезапных выбросов угля и газа. — М.: Недра, 1979. — 296 с.
4. Предупреждение газодинамических явлений в угольных шахтах: сб. документов. Серия 05. Вып. 2 / Колл. авт. — 4-е изд., испр. — М.: ЗАО “Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности”, 2011. — 304 с.
5. Мирер С. В., Хмара О. И., Шадрин А. В. Спектрально-акустический прогноз выбросоопасности угольных пластов. — Кемерово: Кузбассвуиздат, 1999. — 92 с.
6. Шкуратник В. Л., Филимонов Ю. Л., Кучурин С. В. Экспериментальные исследования акустической эмиссии в образцах угля при одноосном нагружении // ФТПРПИ. — 2004. — № 5. — С. 42–49.

7. **Федеральные нормы** и правила в области промышленной безопасности “Инструкция по прогнозу динамических явлений в угольных шахтах и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений”: проект. — М.: ИПКОН РАН, 2015.
8. **Шадрин А. В., Зыков В. С.** Акустическая эмиссия выбросоопасных пластов: обзорная информация. — М.: ЦНИЭИуголь, 1991. — 42 с.
9. **Грешников В. А., Дробот Ю. В.** Акустическая эмиссия. Применение для испытаний материалов и изделий. — М.: Изд-во стандартов, 1976. — 272 с.
10. **Аммосов И. И., Еремин И. В.** Трещиноватость углей. — М.: Изд-во АН СССР, 1960. — 110 с.
11. **Петухов И. М., Линьков А. М.** Механика горных ударов и выбросов. — М.: Недра, 1983. — 280 с.
12. **Москалев А. Н., Васильев Л. М., Млодецкий В. Р.** Предельное равновесие трещин в угольном пласте при нагнетании в него жидкости // ФТПРПИ. — 1979. — № 5. — С. 91–96.
13. **Штумф Г. Г., Егоров П. В., Петров А. И. и др.** Горное давление в подготовительных выработках угольных шахт. — М.: Недра, 1996. — 352 с.
14. **Шадрин А. В., Егоров П. В., Трусов С. Е.** Критерии выбросоопасности, применяемые и разрабатываемые для угольных шахт Кузбасса // Вестн. КузГТУ. — 2003. — № 4. — С. 14–20.
15. **Инструкция** по безопасному ведению горных работ на пластах, опасных по внезапным выбросам угля, породы и газа (РД 05-350-00). Предупреждение газодинамических явлений в угольных шахтах (сб. документов). — М.: НТЦ по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России, 2000. — С. 120–303.
16. **Ржевский В. В., Новик Г. Я.** Основы физики горных пород. — М.: Недра, 1978. — 390 с.
17. **Зыков В. С., Лебедев А. В., Сурков А. В.** Предупреждение газодинамических явлений при проведении выработок по угольным пластам. — Кемерово: КРО АГН, 1997. — 262 с.
18. **Шадрин А. В., Дегтярева М. В.** Факторы, определяющие развитие трещин в угольных пластах // Вестн. Научн. центра по безопасности работ в угольной пром-сти. — 2013. — № 1.1. — С. 127–132.
19. **Фейт Г. Н.** Прочностные свойства и устойчивость выбросоопасных угольных пластов. — М.: Наука, 1966. — 80 с.
20. **Слесарев В. Д.** Механика горных пород и рудничное крепление. — М.: Углетехиздат, 1948. — 303 с.
21. **Клейн Г. К.** Строительная механика сыпучих тел. — М.: Стройиздат, 1977. — 256 с.
22. **Шадрин А. В., Коноваленко В. А.** Основы автоматизированного непрерывного ГДЯ-мониторинга на угольных шахтах Кузбасса // Вестн. КузГТУ. — 2001. — № 3. — С. 28–31.
23. **Ходот В. В.** Внезапные выбросы угля и газа. — М.: Гос. науч.-техн. изд-во лит-ры по горному делу, 1961. — 364 с.

*Поступила в редакцию 3/XII 2015*