

СТАТЬИ

УДК 622.817.4

**МЕТОД ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДА
ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ЗОН С ПОВЫШЕННОЙ ГАЗОТДАЧЕЙ****Муллагалиева Л.Ф., Баймухаметов С.К., Портнов В.С., Юров В.М., Мадисева Р.К.***Карагандинский технический университет, Караганда, e-mail: m_liliya88@mail.ru*

Получено уравнение, которое заключается в том, что скорость распространения акустических волн связана с газоносностью пласта угольного вещества. На этом основан метод акустики в скважинах для определения выделения газа, и с его помощью можно обнаруживать зону с повышенной отдачей газа. Источник акустики, который возникает в шахтных условиях, связан с технологическими процессами выемки угольного вещества. В статье выявлена связь между природным выделением газа из пласта угольного вещества и величиной добычи шахтерами угля в сутки. Она также устанавливает соотношение между природным выделением газа и концентрацией метана. Анализ приведенных выше рассуждений показал, что диапазон коэффициента относительных напряжений K_n составляет 0,8–3 и сравнивается с нашим параметром K , который составляет 0,5–5. Отсюда следует, что если величина параметра $K = V_s/V_p < 3$, то пласт угольного вещества в бассейне города Караганды опасен случайными и внезапными выбросами газа и угля. Иными словами, такой пласт угольного вещества входит в зону с повышенной отдачей газа.

Ключевые слова: акустика, волна, пласт угольного вещества, разрушение угля, выделение газа, отдача газа, выброс газа и угля, зона с повышенной отдачей газа

**METHOD OF USING THE ACOUSTIC METHOD
FOR DETECTING ZONES WITH INCREASED GAS RECOVERY****Mullagalieva L.F., Baymukhametov S.K., Portnov V.S., Yurov V.M., Madisheva R.K.***Karaganda Technical University, Karaganda, e-mail: m_liliya88@mail.ru*

An equation has been obtained, which states that the propagation velocity of acoustic waves is related to the gas content of a coal bed. Based on this, the method of acoustics in wells for determining gas release is based, and with its help we conclude that it is possible to detect a zone with increased gas recovery. The source of acoustics that arises in mine conditions is associated with the technological processes of excavation of coal matter. The article reveals a relationship that establishes between the natural release of gas from a layer of coal matter with the amount of coal miners produce per day. It also establishes the relationship between natural gas emission and methane concentration. An analysis of the above reasoning showed that the range of the relative stress coefficient K_n is 0.8–3 and is compared with our parameter K , which is 0.5–5. From this follows the conclusion that if the value of the parameter $K = V_s/V_p < 3$, then the coal bed in the basin of the city of Karaganda is dangerous to accidental and sudden outbursts of gas and coal. In other words, such a layer of coal matter enters the zone with increased gas recovery.

Keywords: acoustics, wave, coal bed, coal destruction, gas release, gas release, gas and coal release, zone with increased gas release

Повышенная отдача газа в зоне технологических работ в угольных шахтах часто сопровождается случайными или внезапными выбросами газа и угля [1–5]. В работе [6] был подробно исследован процесс газовыделения в угольном пласте, и автор отметил следующее:

– процесс выброса угля и газа сопровождается тем, что основной объем газа образуется прямо из разрушающего угольного вещества;

– метан образуется при разрушении пласта угля в условиях его выемки угольным комбайном и при наличии в пласте угля довольно значительных напряжений.

Внутреннее напряжение угля возрастает с глубиной залегания пласта угольного вещества и составляет примерно 0,7–0,8 от предельного значения прочности угля. Если брать средний уголь марки Д, то минимум внутреннего напряжения (в Па) на средней глубине пласта будет в диапазоне 5–7 МПа. Внутреннее напряжение угля возрастает также в том случае, когда

разрушение угольного пласта происходит не хрупко, а пластично.

Кратко процесс случайного или внезапного выброса газа и угля можно представить следующим образом:

– происходят процессы, которые приводят к разрыву связей в боковых группах различных радикалов, и величина выделившегося метана составляет около $40 \pm 50 \text{ м}^3/\text{т}$;

– при разрушении угольного пласта создается такое количество метана, которое превышает газоносность пласта при внезапных выбросах порядка в 7 ± 10 раз;

– что касается скорости выхода метана из угольного пласта, то ее определяет фильтрационная система, включающая в себя систему трещин и горное давление;

– в процессе механического действия на угольный пласт происходит химическое превращение путем разрыва цепи молекул угля. Этот процесс приводит к выделению наряду с метаном и других газообразных продуктов. Все это сопровождается деструкцией угля, который превращается в мелкую

фракцию «уголь-газ» с размерами 0,08 мм и которая может составлять $14 \pm 37\%$ всей массы выброса. В этом случае уменьшается диффузия и фильтрация, а само газовыделение приобретает вид очень быстрого процесса.

В целом процесс внезапного выброса угля и газа должен учитывать следующие три фактора: напряженно-деформированное состояние угольного пласта, систему «уголь – газ – вода» и ее физико-механические свойства, систему «уголь – газ – вода» и ее структурно-химические свойства.

В статье будет получено уравнение, которое заключается в том, что скорость распространения акустических волн связана с газоносностью пласта угольного вещества. На этом основан метод акустики в скважинах для определения выделения газа и с его помощью можно обнаруживать зону с повышенной отдачей газа.

Материалы и методы исследования

Схема участка пласта угля при его выемке комбайновым методом по данным работы [7] показана на рис. 1. В этой работе установлено, что источник акустики в исследуемой спектральной области связан не с распространением волн от работы комбайнов или других механизмов. Акустика в данном диапазоне длин волн связана с характерным возникновением трещин при разрушении пласта угольного вещества. При этом, как правило, трещины дают отклик на силовое воздействие в момент их возникновения как резонансное. Возникающие при этом резонансы представ-

ляют собой акустические (трещиноватые) колебания. Они распространяются от первой трещины до плоскости, в которой присутствует максимальное опорное давление. Достигнув этой плоскости, акустические колебания отражаются и попадают на источник акустики (рис. 1).

На рис. 2 показано, как распространяются колебания акустики в пласте угольного вещества. Выделены пунктиром три зоны, которые отличаются друг от друга распределением внутренних напряжений в пласте угольного вещества в процессе отработки горной выработки. Первая зона начинается с момента образования трещин, и возникающая акустическая волна распространяется до зоны, где находится плоскость максимума опорного давления. Часть акустической волны отражается, а часть уходит далее.

Колебание акустики распространяется от источника колебаний, которым служит зона первого разрушения угля вблизи забойной области угольного пласта. При этом угольный пласт рассматривается как акустический волновод, который сверху ограничен кровлей, а снизу ограничен почвой выработки. Этот волновод состоит из пород, которые значительно отличаются по своим свойствам от угольного пласта. Поскольку поверхность этих границ совершенно неидеальна, то и поверхность подобно волновода отражает степень неидеальности отражения. Степень отражения акустических волн зависит от коэффициентов крепости угольного пласта и может составлять в пределе около 10 раз.

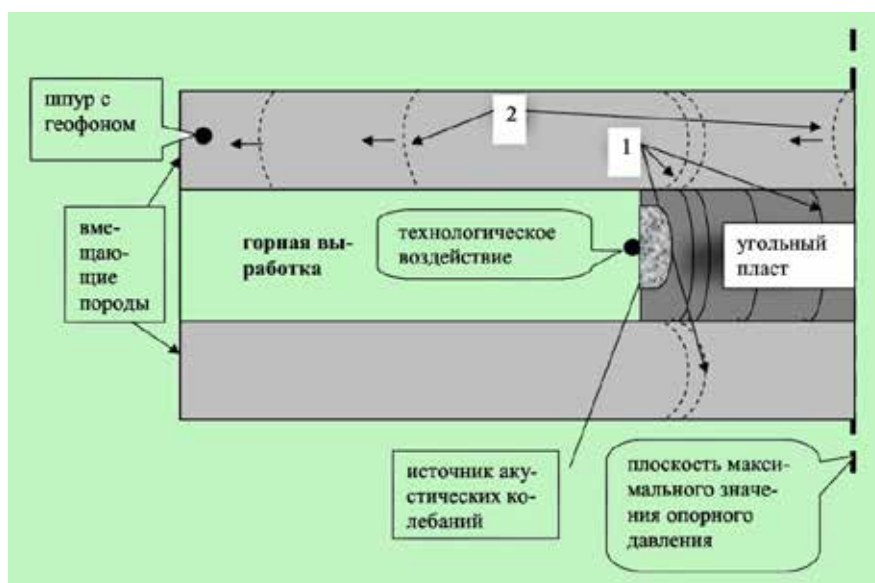


Рис. 1. Схема участка пласта угля и источник акустики [7]

1 – волны акустики от источника колебаний; 2 – отраженные волны акустики

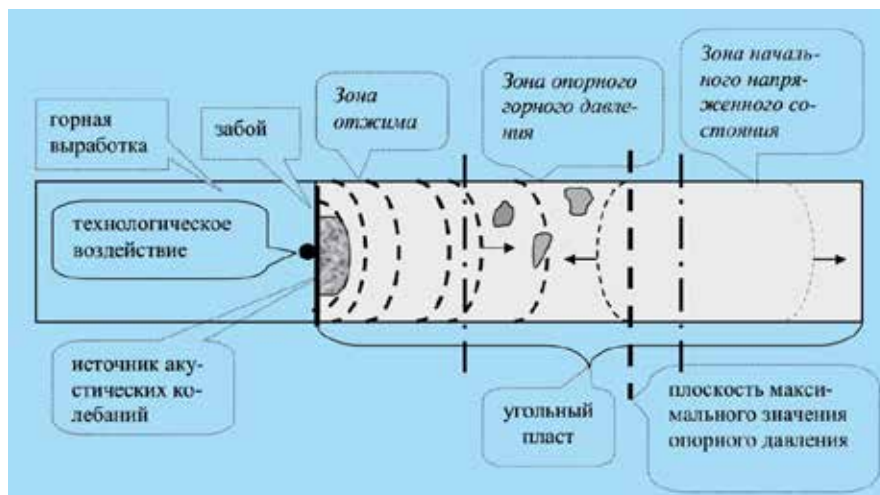


Рис. 2. Распространение акустических волн в пласте угольного вещества [7]

В зоне вблизи забойной области колебания акустики проходят сквозь угольный пласт, который, в общем случае, представляет собой среду с переменными параметрами. При этом изменения напряженного состояния в подобной среде сводятся к параметрам эпюры напряжений и связаны с протяженностью зоны высокого горного давления. Эта зона может простираться на расстояние до 120 м. В работе [7] показано, что прозвучивание угольного пласта в режиме разрывных нарушений можно осуществлять в качестве индикатора напряженно-деформированного состояния этого же пласта. На рис. 3 показана схема методов акустики по ГОСТ 18353-79, согласно которой методы акустики могут быть разделены на две группы: из которых первая использует активные, а вторая – пассивные методы (рис. 4).

Активная акустика применяет методы бегущих волн, которые, во-первых,

работают с проходящими и отраженными волнами, а во-вторых, работают как с проходящими, так и с отраженными волнами. Методы пассивной акустики включают бегущие волны и носят название – акустико-эмиссионный метод. Этот метод обычно используют, когда происходит внутренняя динамическая перестройка его структуры. Из рис. 2 видно, что колебания акустики можно представить как фильтр, который спектр колебаний разделяет на два вида, а именно на высокочастотную и низкочастотную составляющие.

Если буровзрывные работы проводятся в зонах повышенной газоотдачи, то это может вызвать распространение волн акустики, вызванных взрывом или ударом. Распространяясь в массиве, волна акустики отражается и преломляется, а затем часть ее возвращается на поверхность, где она регистрируется виброприемником.



Рис. 3. Классификация акустических методов контроля по ГОСТ 18353-79

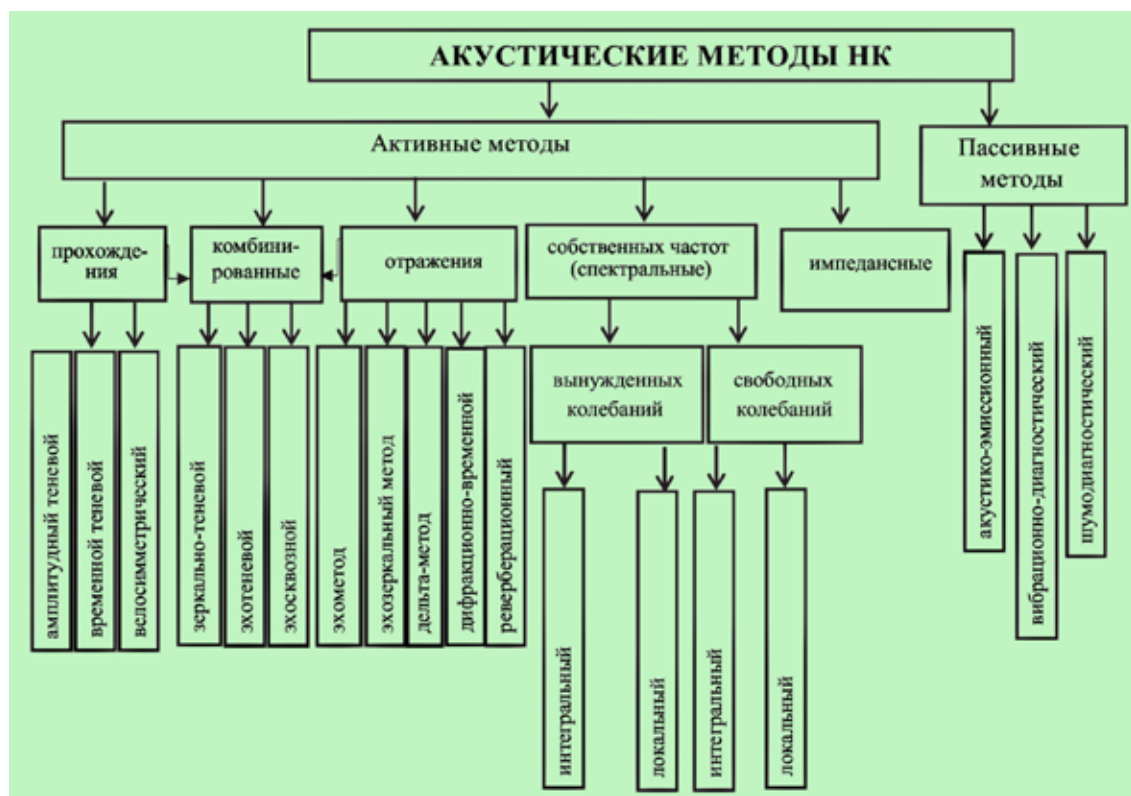


Рис. 4. Классификация акустических методов контроля по ГОСТ 23829-79

Таблица 1

Акустические свойства угля и пород [8]

Тип пород	Толщина пласта Н, м	Плотность Р, Г/см ³	Скорость поперечной волны V _s , м/с	Скорость продольной волны V _p , м/с
Песчаник	8–24	2,67	2633	4757
Аневролит	0–0,2	2,68	2328	4163
Уголь	1,2–1,4	1,55	1280	2373

Как формируется амплитудно-частотный спектр колебаний массива угля и пород, в качестве примера, мы рассматриваем при проходческих работах буровзрывным способом на угольном пласте ОАО «Гуковуголь» Восточного Донбасса из работы [8]. В табл. 1 показаны типы пород и основные акустические свойства угля и вмещающих пород на данном участке.

Из табл. 1 следует, что волны акустики угольного пласта и породами резко отличаются. Амплитудно-частотный спектр составляющей высокой частоты можно рассчитать по уравнению: $V_k = 0,9$; $V_s = 1152$ м/с, где V_k – скорость волны Лява в пласте угольного вещества, V_s – скорость поперечной волны в пласте угольного вещества. При этом

длина волны Лява λ равна кратной величине мощности пласта Н, т.е. мощности волновода. Волноводом в нашем случае выступает толщина пласта угольного вещества, равная 1,4 м. В этом случае максимум амплитуды акустического спектра высокой частоты будет равен значению $f_{max} = V_k/\lambda = 823$ Гц. На рис. 5, а, показаны полученные в работе [8] экспериментальные частотные кривые, полученные при взрыве пласта угольного вещества.

Из рис. 5, а, следует, что частотный спектр обнаруживает два максимума с частотами $\Delta f_1 = 70–200$ Гц и $\Delta f_2 = 580–700$ Гц. Этот спектр отражает тот факт, что колебательный процесс в пласте угольного вещества распадается на две группы.

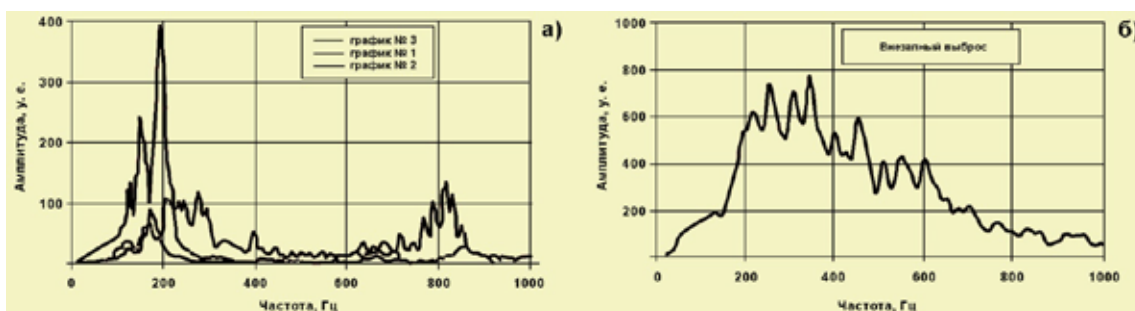


Рис. 5. Колебания, полученные при взрыве пласта угольного вещества [8]

Первая группа относится к колебательному процессу, который связан с породными отложениями в угле, поскольку плотность ее больше, чем у угля. Колебания этой группы отвечают скорости $V_1 = \lambda f_1 = 540$ м/с. Вторая группа относится к колебательному процессу, который связан непосредственно с разрушением пласта угольного вещества. Ему отвечает скорость $V_2 = \lambda_2 f_2 = 952$ м/с. Величина, равная отношению $K = A_2^{\max} / A_1^{\max} = 0,2$, может служить фактом низкой степени опасности горного удара и связанного с ним случайного или внезапного выброса газа и угля. Такой процесс показан на рис. 5, б. Этот рисунок иллюстрирует внезапный выброс газа и угля, отличный от состава спектра акустики (рис. 5, а). Спектральный состав в диапазоне от 60 Гц до 800 Гц представлен на рис. 5, б, а модуль амплитуды больше величины K в десять раз (рис. 5, а).

Результаты исследования и их обсуждение

Карагандинский угольный бассейн из-за неустойчивости горной выработки более доступен для акустических исследований [9] и более взрывоопасен. Мы воспользуемся методом аналогий, чтобы получить связь между газоотдачей угольного пласта и скоростью распространения акустических волн. Аналогия между акустикой и электричеством представлена в табл. 2 и известна уже давно [10].

Используя закон Ома и данные из табл. 2, нетрудно получить, что скорость распространения акустических волн связана с газоносностью угольного пласта уравнением

$$c_0 = \delta / V_s, \quad c_0 = \eta / V_p. \quad (1)$$

Из формулы (1) следует

$$E = \delta / \eta = V_s / V_p, \quad (2)$$

где V_s – составляющая низкой частоты; V_p – составляющая высокой частоты из спектрального распределения акустических сигналов (табл. 1).

Таблица 2

Аналогия между акустикой и электричеством [10]

Система акустики	Система электрическая
Давление P	Напряжение U
Скорость частиц V	Ток I
Смещение u	Заряд e
Плотность среды ρ	Индуктивность L
Акустическая емкость $C_A = 1/\tau$	Емкость C
Акустическое сопротивление R_A	Сопротивление R

Если взять оценку связи между газоносностью и электрическим сопротивлением углей из формулы (2) и взять ρ_K угля по данным работы [11] при температурах $T_1 = 873$ К и $T_2 = 973$ К, то мы получим:

$$\delta V_p / \eta V_s = 4,3 \cdot 10^2.$$

Беря для угля $V_s = 1280$ м/с и $V_p = 2373$ м/с из табл. 1, имеем для величины $K = 0,5$, где $K = A_2^{\max} / A_1^{\max} = 1$. В нашем случае это отношение равно $8,2/90,7 = 0,2$ может интерпретироваться как низкая степень опасности развития внезапного выброса угля, породы и газа или горного удара. При внезапном выбросе угля и газа параметр K превышает предыдущую величину в 10 раз, т.е. $K = 5$. Рассмотренный подход к выделению выбросоопасных зон методами сейсмоакустики может быть использован в работе геомеханической службы Угольного департамента АО «АрселорМиттал Темиртау». Проанализируем этот вопрос подробнее, используя работу [12], где контроль массива угольных пластов выполнялся по параметрам искусственного акустического сигнала. Оценка деформаций угольного пласта проведена по резонансным частотам спектров акустических сигналов. Существует зависимость между резонансной

частотой и мощностью резонирующего слоя – $f_p = V_p / h$, где V_p – фазовая скорость поперечных волн (высокочастотная составляющая спектра акустических сигналов); h – мощность резонирующей толщи пород. Скорость V_p определена эмпирически и составляет 2500 м/с. Амплитуда резонансных частот зависит в основном от степени ослабления контакта.

Коэффициент относительного напряжения K_n (рис. 6) имеет величину 0,8–3,0. В нашем случае эта величина принимает значение 0,5–5,0. Этот эффект с K_n обусловлен в основном с падением кон-

центрации метана, которая стремится к ее минимуму.

Как уже отмечалось, среднесуточная добыча угля в зонах отсутствия тектонических нарушений связана с концентрацией метана и напряженным состоянием угольного пласта, о чем свидетельствуют данные табл. 3 [12].

Таблица 4 показывает, что величина напряжений пласта угля, выраженная в относительных единицах $K = K_n$, связана определенным образом с концентрацией метана в зонах, которые представляют опасность для выброса газа и угля.

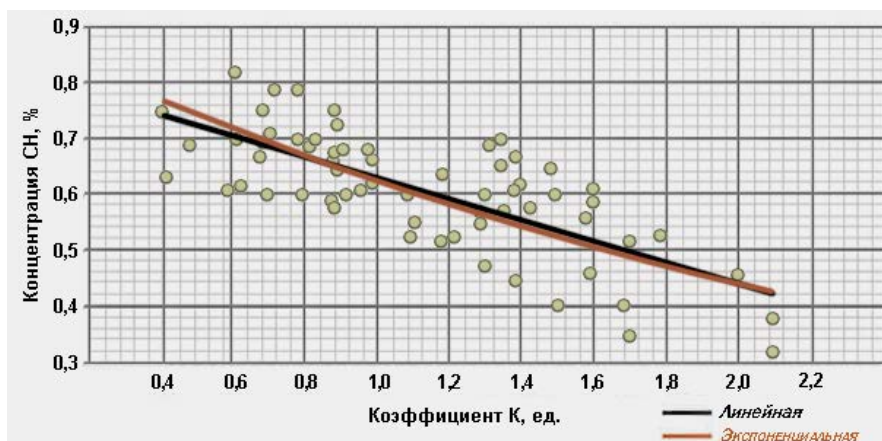


Рис. 6. Корреляционная связь между концентрацией метана и внутренним напряжением пласта угля [12]

Таблица 3

Зависимость концентрации метана CH_4 от K [12]

Целик	Выборка, м ³	Зависимость CH_4 от K , %	Величина CH_4 при $K = 1\%$	Величина газа пласта угля, м ³ /т с. б. м.	Добыча угля в сутки, т
24–58	33	0,845–0,090	0,75	25	11,5
24–59	64	0,820–0,189	0,63	25	8,9
25–96	90	0,690–0,0520	0,50	21	8,7
52–12	33	0,843–0,165	0,79	10	15,8
52–12*	24	2,737–0,987	1,75	10	15,8
Среднее		0,799–0,129	0,67		

Таблица 4

Отношение величин $K = K_n$ и концентрации метана [12]

Лава	Количество определений	Коэффициент K		Концентрация метана, %	
		макс.	отнош.	макс.	отнош.
24–58	7	2,4	1,87	0,82	2,06
24–59	19	2,6	2,1	0,7	1,6
25–96	18	2,4	2,06	0,7	1,55
52–12	2	1,9	2,8	0,9	2,07
52–12*	10	2,45	2,16	3,14	2,16

Анализ приведенных выше рассуждений показал, что диапазон коэффициента относительных напряжений K_n составляет 0,8–3 и сравнивается с нашим параметром K , который составляет 0,5–5.

Получаем, если параметр $K = V_s/V_p < 3$, угольный пласт входит в зону с повышенной газоотдачей и опасен внезапными выбросами угля и газа.

Заклучение

В теории нам удалось получить, что скорость распространения акустических волн связана с газоносностью угольного пласта простым уравнением. Если параметр $K = V_s/V_p < 3$, то угольный пласт в угольном бассейне г. Караганды составляет наибольшую опасность случайных или внезапных выбросов газа и угля.

Это, в свою очередь, приводит к катастрофам, связанным с гибелью шахтеров. Поэтому в подземных условиях нужно иметь датчики, которые бы давали сигнал о попадании технологических работ в такую зону. Настоящая статья и посвящена именно такому вопросу.

Список литературы

1. Колесниченко Е.А., Артемьев В.Б., Колесниченко И.Е. Внезапные выбросы метана: теоретические основы. М.: Горное дело, 2013. 232 с.
2. Фельдман Э.П., Василенко Т.А., Калугина Н.А. Физическая кинетика системы угольный пласт – метан: массоперенос, предвыбросные явления // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2014. № 3. С. 46–65.
3. Булгаков Ю.Ф., Овчаренко В.Л. Проблемы безопасной разработки выбросоопасных пластов. Донецк, 2015. 84 с.
4. Осипова И.А. Подход к созданию комплексной модели исследования прогноза внезапных выбросов угля и газа // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 3–1. С. 170–177.
5. Колесниченко И.Е., Колесниченко Е.А., Любомищенко Е.И., Колесниченко Е.И. Механизм внезапных выбросов метана в угольных пластах // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 1. С. 108–120.
6. Малиникова О.Н. Условия формирования и методология прогнозирования газодинамических явлений при техногенном воздействии на угольные пласты: автореф. дис. ... докт. техн. наук. М., 2011. 47 с.
7. Король В.И., Скобенко А.В. Акустический способ прогноза газодинамических явлений в угольных шахтах. Днепропетровск: Национальный горный университет, 2013. 181 с.
8. 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.
9. Узбеков А.Н., Михайлова Н.Н. Сейсмичность Центрального Казахстана и направления развития мониторинга этого региона // Вестник НЯЦ РК. 2018. Вып. 3. С. 73–82.
10. Иванов И.Е., Ерещенко В.Е. Методы подобия физических процессов. М.: МАДИ, 2015. 144 с.
11. Зубкова В.В., Еджейвич П., Гебска У. Влияние температуры нагревания на изменение удельного электросопротивления твердых остатков термической деструкции спекающихся углей // Кокс и химия. 2000. № 9. С. 16–22.
12. Костеренко В.Н., Смирнов Р.О., Аксенов З.В. Динамика газовыделений в очистных забоях // Горная промышленность. 2019. № 2 (144). С. 52–55.