

Определение температурных границ стадий самовозгорания угля

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2022-9-61-66>

Задачу создания безопасных условий труда на угольных шахтах можно отнести к категории весьма сложных и многофакторных. База нормативных документов в области безопасности горного производства должна постоянно пополняться и корректироваться с учетом результатов исследований, проводимых научно-исследовательскими организациями. Особенно актуальны вопросы, относящиеся к проблемам горного давления, газовой и пожарной безопасности, газодинамическим и геодинамическим явлениям.

В статье рассмотрен один из аспектов безопасных условий труда, а именно – обеспечение пожарной безопасности. Выполнен анализ методов прогнозирования эндогенных процессов, представлены результаты экспериментов, направленных на определение критериев признаков стадий самонагрева для условий угольных шахт Карагандинского угольного бассейна.

Ключевые слова: пожаробезопасность, эндогенный пожар, химическая активность углей, низкотемпературное окисление, самовозгорание, непредельные углеводороды, выработанное пространство, изолированный участок.

Для цитирования: Определение температурных границ стадий самовозгорания угля / С.Б. Алиев, Р.Р. Ходжаев, Б.М. Кенжин и др. // Уголь. 2022. № 9. С. 61-66. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-9-61-66.

ВВЕДЕНИЕ

Используемые в Карагандинском угольном бассейне методы и документы (инструкции, руководства), относящиеся к проблеме предупреждения эндогенных пожаров в угольных шахтах, зачастую не позволяют однозначно отнести обнаруженные признаки эндогенных процессов к какой-либо их стадии: низкотемпературному окислению, самонагреванию, ранней стадии самовозгорания, пожару или его затуханию. Особенно это относится к определению температуры в недоступных и труднодоступных зонах контролируемых участков или объектов – выработанных пространствах действующих выемочных участков и изолированных отработанных участках, а также в отработанных изолированных участках смежных шахт.

В таких случаях величина температуры – это единственный критерий для корректной оценки текущих стадий развития эндогенного пожара. В настоящее время единственным косвенным методом определения температуры в контролируемых зонах или объектах, или очагах в шахтах Карагандинского бассейна остается метод по соотношению непредельных углеводородов в пробах рудничной атмосферы.

АЛИЕВ С.Б.

Академик НАН РК,
член Президиума АГН,
доктор техн. наук, профессор,
старший научный сотрудник ИПКОН РАН,
111020, г. Москва, Россия,
e-mail: alsamat@gmail.com

ХОДЖАЕВ Р.Р.

Иностранный член АГН,
доктор техн. наук,
профессор КарТУ им. А. Сагинова,
100027, г. Караганда, Республика Казахстан,
e-mail: nicgeomark@mail.ru

КЕНЖИН Б.М.

Иностранный член АГН,
доктор техн. наук, профессор,
член Совета директоров КарТУ им. А. Сагинова,
100027, г. Караганда, Республика Казахстан,
e-mail: kbmzk@mail.ru

СМИРНОВ Ю.М.

Иностранный член АГН,
доктор техн. наук,
профессор КарТУ им. А. Сагинова,
100027, г. Караганда, Республика Казахстан,
e-mail: smirnov_y_m@mail.ru

ГРЕЧИШКИН П.В.

Канд. техн. наук,
директор Кемеровского филиала АО «ВНИМИ»,
650040, г. Кемерово, Россия,
e-mail: pv_grechishkin@mail.ru

АСАИНОВ С.Т.

Канд. техн. наук,
старший преподаватель КарТУ им. А. Сагинова,
100027, г. Караганда, Республика Казахстан,
e-mail: nicgeomark@mail.ru

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ УГЛЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ САМОНАГРЕВАНИЯ

Непредельные углеводороды (этилен C_2H_4 , ацетилен C_2H_2) являются продуктами термоокислительной деструкции угля. В нормальных условиях содержание их в атмосфере составляет $(3-5) \cdot 10^{-7}$ об.%, а отношение этилена к ацетилену близко к единице. С повышением температуры нагревания угля содержание этих газов в атмосфере возрастает по экспоненциальной зависимости, однако скорости нарастания их концентраций различны, следовательно, различны и численные значения их отношений. Кроме того, установлено, что разбавление этилена и ацетилена воздухом шахтной атмосферы по мере удаления от очага самонагревания угля происходит пропорционально, то есть не влияет на их соотношение. Эти свойства и положены в основу метода определения температуры угля в результате самонагревания.

Экспериментальными исследованиями установлены зависимости изменения отношения этилена к ацетилену от температуры самонагревания для основных пожароопасных углей пластов Промышленного, Саранского и Шахтинского участков Карагандинского бассейна.

На рис. 1 представлены графики этих зависимостей для пластов K_{12} , K_{10} и d_6 .

Как следует из приведенных графиков, наиболее интенсивное увеличение отношения содержания непредельных углеводородов соответствует интервалу температур от 100 до 200-250°C, то есть именно стадии перехода от низкотемпературного окисления к самовозгоранию.

Практическое использование положений и метода по Инструкции по предупреждению и тушению эндогенных пожаров на угольных предприятиях УД АО «АрселорМиттал Темиртау» на шахтах Карагандинского бассейна показало некоторые затруднения, вызванные следующими причинами:

- сложность отбора качественных проб шахтной атмосферы в специальные трубки-концентраторы;
- требование высокой точности газоанализаторов для измерения концентраций непредельных углеводородов порядка 10^{-7} об.%;
- не редки случаи отсутствия одного из газов, что приводит к использованию усредненных величин и искажению результатов и выводов.

Кроме этого, с изменением глубины залегания угольных пластов изменяются метаморфизм и метаноносность угля, их физико-химические свойства, показатели химической активности, влияющие на склонность к самовозгоранию, на величину критической температуры самовозгорания. Тем не менее этот документ используется специалистами шахт в случаях возникновения ситуаций с обнаружением признаков самонагревания угля.

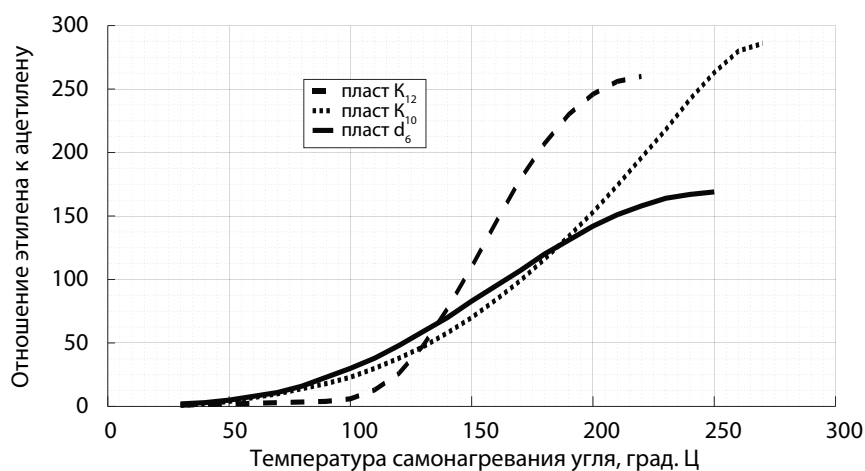


Рис. 1. Графики экспериментально установленных зависимостей изменения отношения этилена к ацетилену от температуры самонагревания угля для пластов K_{12} , K_{10} и d_6 Карагандинского бассейна

В связи с этим необходимо периодически (через определенные глубины) выполнять экспериментальные исследования для получения более надежных оценок и принятия решений.

Основной задачей, решение которой в определенной степени позволит установить стадию эндогенного процесса в массиве угля или в выработанном пространстве, ставится разработка метода расчета численной величины температуры по результатам анализов проб рудничной атмосферы контролируемого участка, не доступного для инструментальных измерений.

При всех известных его погрешностях газоаналитический метод оценки состояния эндогенной пожароопасности остается пока единственным в ситуациях невозможности доступа и визуально-инструментального обследования контролируемого участка или объекта.

В интервале температур самонагревания угля до 350°K (77°C) для углей различной влажности в результате экспериментов получена эмпирическая зависимость:

$$C_{CO}/\Delta C_{O_2} = (0,0001 \cdot V^r + 3 \cdot 10^{-5}) \cdot t^{-0,003 \cdot V^r} \quad (1)$$

График, иллюстрирующий данную зависимость при разных величинах влажности угля, приведен на рис. 2.

Из графиков функций следует, что критерий, выраженный отношением $C_{CO}/\Delta C_{O_2}$, принимает значение в диапазоне температур до 70-80°C, что близко к критической температуре самовозгорания каменных углей Карагандинского бассейна. Следовательно, рассматриваемый критерий может быть использован в практике распознавания стадий самонагревания и самовозгорания углей с целью предупреждения возникновения эндогенных пожаров при условии уточнения эмпирических коэффициентов для углей Карагандинского бассейна.

На первом этапе этих экспериментов получены эмпирические зависимости процентного содержания пожарных индикаторных газов от температуры нагревания (или самонагревания) угля, графики которых представлены на рис. 3. Исследования проводились на большом количестве проб углей всех пожароопасных пластов Карагандинского бассейна.

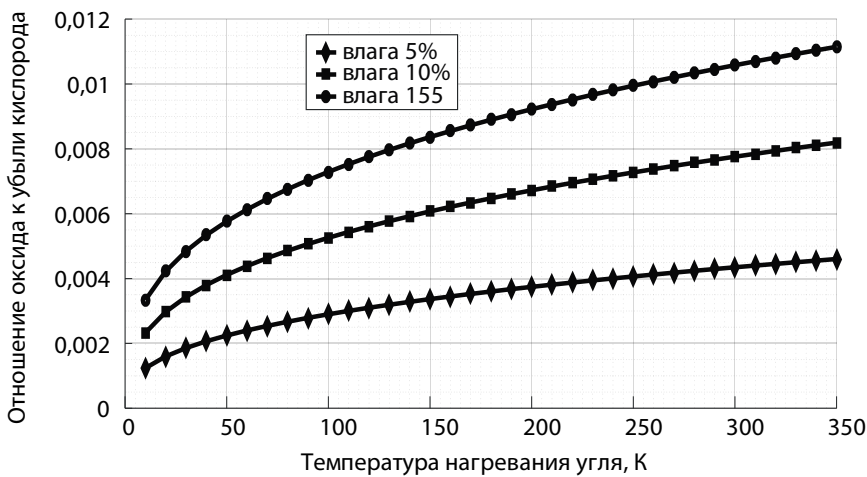
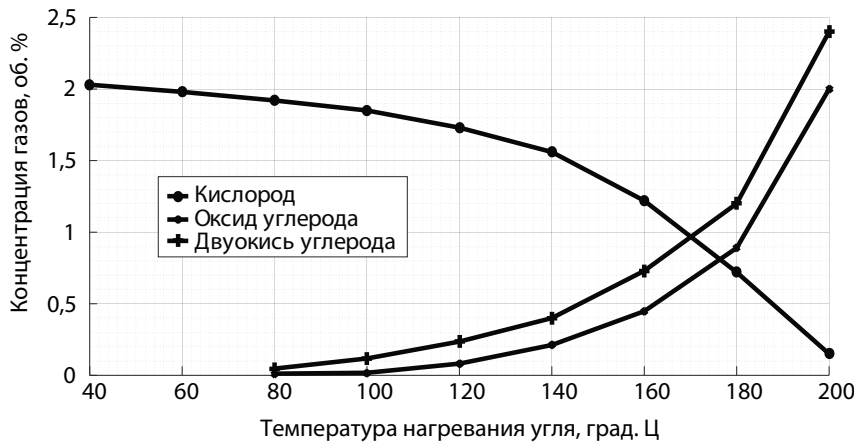


Рис. 2. Графики зависимостей отношения содержания оксида углерода CO к убыли кислорода ΔO_2 в шахтной атмосфере от температуры самонагрева углей Донецкого бассейна при влажности 5% (нижняя линия), 10% и 15%



Примечание: концентрация кислорода на графике уменьшена в 10 раз.

Рис. 3. Изменение концентрации кислорода, оксида и двуоксида углерода в зависимости от температуры самонагрева угля всех пластов

Методика проведения экспериментов заключалась в следующем. В специальном сосуде с газоотводящими трубками и термометрами в условиях водяной бани нагревалась навеска пробы угля фракции 1-3 мм. Периодически, по мере нагревания, через определенные тем-

представленного профилактической службой Карагандинского филиала РГКП профессиональной военизированной аварийно-спасательной службы (КФ ПВАСС). Основная цель этапа заключалась в расчете температуры рудничной атмосферы в контролируемом очаге самона-

пературные промежутки отбирались пробы воздушной смеси из трубки в камере-сосуде. Анализ проб проводился по методике выполнения измерений хроматографом на объемное содержание оксида углерода CO, диоксида углерода CO₂ и водорода H₂.

В результате проведения серии экспериментов получены эмпирические зависимости содержания (в об.%) пожарных индикаторных газов от температуры нагревания угля для наиболее пожароопасных пластов K₁₂ и d₆ разных шахт Карагандинского бассейна, формулы которых приведены в табл. 1.

С целью изучения температурных границ выделения пожарных индикаторных газов анализ зависимостей представлен в виде графиков. Эти зависимости использовались в ряде случаев для оценки состояния самонагрева угля и обоснования разработки предупредительных мероприятий на шахтах Карагандинского бассейна.

Исследования угля пласта K₁₂

В табл. 2 приведены рассчитанные по формулам 2 и 4 (см. табл. 1) величины выделения пожарных индикаторных газов – оксида углерода CO и двуоксида CO₂ в экспериментах по нагреванию угля пласта K₁₂.

На втором этапе для исследований и получения количественных значений ранее указанных агрегатных критериев обработаны результаты хроматографического анализа контрольных проб шахтной атмосферы, выполненного и

Таблица 1

Формулы эмпирических зависимостей для пластов K₁₂ и d₆ по результатам лабораторных исследований

Индекс угольного пласта	Зависимости процентного содержания оксида углерода (CO), водорода (H ₂) и диоксида углерода (CO ₂) от температуры самонагрева угля
K ₁₂	$C(CO) = 0,0004 \cdot \exp(0,186 \cdot t^{0,72})$, об.% (2)
	$C(H_2) = 0,0002 + 0,0078 \cdot \exp(-0,59 \cdot 10^{-6} \cdot (300 - t)^{2,98})$, об.% (3)
	$C(CO_2) = 0,02 \cdot \exp(0,00401 \cdot t^{1,33})$, об.% (4)
d ₆	$C(CO) = 0,00001087 \cdot \exp(0,06112 \cdot t)$, об.% (5)
	$C(H_2) = 0,0002 + \exp(-0,026 \cdot (300 - t)^{1,7} / (t - 100))$, об.% (6)
	$C(CO_2) = 0,01 \cdot \exp(0,406 \cdot 10^{-4} \cdot t^{2,26})$, об.% (7)

гревания участка в зависимости от процентного содержания индикаторных газов. Для анализа и математическо-статистической обработки приняты данные извещений пылегазоаналитической лаборатории КФ ПВАСС по контролю атмосферы за перемычкой № 1486 в 3-западном полевом штреке шахты им. Костенко за период с 29.03.2018 по 01.10.2018, то есть за 187 суток.

На следующем, третьем, этапе исследований ставилась конечная цель – установление и получение корреляционных зависимостей расчетной температуры самонагрева угля в контролируемом объекте участка от ранее указанных интегрированных критериев, представляющих определенные агрегатные соотношения из количественных величин выделенных индикаторных газов.

Расчеты выполнялись для каждого из наблюдений с использованием в программной среде MATLAB по специально разработанной и предназначенной для научно-технических исследований прикладной программе.

В представленных ниже формулах и выражениях приняты обозначения:

– TR_CO – расчетная температура самонагрева угля всех пластов (кроме K_{12} и d_6) по содержанию в пробе оксида углерода (CO);

– TR_CO_D6 – расчетная температура самонагрева угля по содержанию оксида CO для пласта d_6 ;

– TR_CO_K12 – расчетная температура самонагрева угля по содержанию оксида CO для пласта K_{12} ;

– TR_CO2 – расчетная температура по содержанию двуокиси (CO₂);

– TR_CO2_D6 – расчетная температура по содержанию двуокиси (CO₂) для пласта d_6 ;

– TR_CO2_K12 – расчетная температура по содержанию двуокиси (CO₂) для пласта K_{12} ;

– TR_O2 – расчетная температура по убыли кислорода ($-\Delta O_2$) для всех шахтопластов.

Критерии, вычисляемые для каждого натурального наблюдения, следующие:

– K1 – отношение концентрации оксида CO к dO_{2-1} (CO/ $-\Delta O_2$);

– K2 – отношение концентрации оксида CO к dO_{2-2} (CO/ $-\Delta O_2$);

– KG1 – критерий Грэхема ($100 \cdot CO / -\Delta O_2$);

Расчетные величины индикаторных пожарных газов, выделившихся при нагревании угля пласта K_{12} (см. формулы 2 и 4 табл. 1)

Температура самонагрева, °С	Содержание индикаторных газов, об. %	
	CO	CO ₂
10	0,0011	0,0218
20	0,0020	0,0248
30	0,0034	0,0289
40	0,0057	0,0344
50	0,0090	0,0415
60	0,0139	0,0506
70	0,0210	0,0628
80	0,0314	0,0781
90	0,0461	0,0984
100	0,0671	0,1250
110	0,0966	0,1602
120	0,1377	0,2068
130	0,1948	0,2688
140	0,2734	0,3518
150	0,3812	0,4635

– KG2 – критерий Грэхема ($100 \cdot CO / -\Delta O_2$);

– KYU – критерий Юнга (CO₂/ $-\Delta O_2$);

– dO_{2-1} (или $-\Delta O_2$) – убыль кислорода по методике КО ВНИИГД (расчетное содержание кислорода минус содержание по замеру);

– dO_{2-2} (или $-\Delta O_2$) – убыль кислорода по методике головного ВНИИГД (расчетное содержание кислорода минус содержание по замеру).

Уравнения зависимостей для выполнения расчетов принимались в виде показательных или экспоненциальных функций. В табл. 3 приведены формулы эмпирических зависимостей с оценками коэффициентов уравнений и уровня корреляционной связи между принятыми критериями и расчетными температурами атмосферы в контролируемых участках.

Как следует из табл. 3, корреляция между принятыми критериями и расчетными температурами достаточно

Таблица 3

Эмпирические зависимости и статистические оценки связи

Формула эмпирической зависимости	Оценка R ²
TR1_1=232,4·K1 ^{0,171}	0,6162
TR1_2=134,7·exp(0,08076·K1) – 86,46·exp(-109,8·K1)	0,6807
TR1_3=111,8·exp(0,04535·KG1) -102,9·exp(-3,193·KG1)	0,7871
TR1_4=101,9·KG1 ^{0,2274}	0,7260
TR1_5=109·exp(0,06668·KG2) – 104·exp(-5,34·KG2)	0,7566
TR1_6=108,2·KG2 ^{0,2221}	0,7094
TR2_1=197,5·exp(0,01555·d_O2_1) -120,7·exp(-0,7524·d_O2_1)	0,6816
TR2_2=157,3·d_O2_1 ^{0,1755}	0,6409
TR3_1=134,9·exp(0,02485·d_O2_1) -104,4·exp(-0,5084·d_O2_1)	0,7212
TSR_1=196,6·exp(-0,01638·KG1) – 50·exp(-1,506·KG1)	0,6923
TSR_2=177,9·exp(0,0127·d_O2_1) – 89,75·exp(-0,5462·d_O2_1)	0,6825

высока, что позволяет использовать приведенные зависимости для прогноза температуры в атмосфере аварийного или контролируемого участка по результатам оперативного отбора и анализа проб воздуха.

Если при отборе проб шахтной атмосферы осуществлялись процедуры для определения содержания непредельных углеводородов – этилена и ацетилена, температуру в предполагаемом очаге для некоторых пластов можно рассчитать по их отношению.

ВЫВОДЫ

Получены следующие результаты исследований:

– установлены зависимости изменения отношения этилена к ацетилену от температуры самонагрева для основных пожароопасных углей пластов Промышленного, Саранского и Шахтинского участков Карагандинского бассейна. Обозначены недостатки приведенной выше методики. Установлено, в частности, что она нуждается в периодической актуализации в зависимости от горно-геологических условий отработки запасов угольных шахт;

– на основании результатов натуральных экспериментов определены эмпирические зависимости процентного содержания пожарных индикаторных газов от температуры угля. Выполнены расчеты температуры рудничной атмосферы в контролируемом очаге самонагрева участка в зависимости от процентного содержания индикаторных газов. Проведена апробация результатов на ряде шахт бассейна с целью наработки мероприятий по обеспечению пожарной безопасности;

– установлены корреляционные зависимости расчетной температуры окисляющегося угля в пределах контролируемого объекта от ранее интегрированных критериев, которые представляют собой агрегатные соотношения из количественных величин индикаторных пожарных газов;

– для аналитической обработки данных разработаны специальные прикладные программы. Использование вычислительной техники позволило получить эмпирические зависимости с оценками коэффициентов уравнений и уровня корреляционной связи между принятыми критериями и расчетными температурами рудничной атмосферы.

Угольные шахты справедливо относят к самым опасным видам производства. Свидетельством этому является один только перечень возможных аварий, которые в своем развитии способны переходить в категорию катастроф: взрывы газа-метана, внезапные выбросы угля и газа, рудничные пожары эндогенной и экзогенной природы, горные удары, влияние изменений напряженно-деформированного состояния массива горных пород или горного давления, подтопления горных выработок и т.д.

Поэтому научные исследования, направленные на решение проблем безопасности производства на угольных шахтах, никогда не потеряют актуальность и даже небольшие шаги в этом направлении, отражен-

ные в представленной статье, позволят в определенной мере способствовать обеспечению охраны здоровья и жизни персонала, осуществляющего подземную разработку угля.

Список литературы

1. Инструкция по предупреждению и тушению эндогенных пожаров на угольных предприятиях УД АО «АрселорМиттал Темиртау». Караганда: ТОО «НИЦ «ГеоМарк», 2018. 108 с.
2. Руководство по контролю за возникновением эндогенных пожаров на шахтах УД АО «АрселорМиттал Темиртау». Караганда: КазНИИБГП, 2009. 36 с.
3. Греков С.П., Пашковский П.С., Орликова В.П. Определение температуры самонагрева угля по соотношению оксида углерода и убыли кислорода на аварийном участке // BEZPIECZENSTWO I TECHNIKA POZARNICZA, 2015. № 3. С. 119–127.
4. Prediction and control of spontaneous combustion in thick coal seams / R. Moria, R. Balusu, K. Tanguturi et al. / 13th Coal Operators' Conference, University of Wollongong, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy & Mine Managers Association of Australia, 2013. P. 232–239.
5. Шлапаков П.А., Колыханов В.В., Хаймин С.А. Газоаналитический метод обнаружения подземных пожаров в угольных шахтах // Вестник НЦ ВостНИИ. 2017. №1. С. 14-18.
6. Говор Р.А. Технологические и технические решения по профилактике и тушению эндогенных пожаров на шахтах ОАО «ОУК «ЮЖКУЗБАССУГОЛЬ» // Записки Горного института. 2006. Т. 167. Часть 2. С. 89-92.
7. Пучков Л.А., Каледина Н.О., Кобылкин С.С. Аэродинамический метод предупреждения эндогенной пожароопасности выработанных пространств угольных шахт. М.: МГУ, 2012. С. 302-311.
8. Греков С.П., Орликова В.П. Комплексная оценка эндогенной пожароопасности угольного скопления в шахте // Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования. 2020. № 3. С. 120-125.
9. Луговцова Н.Ю. Оценка экологических рисков от эндогенных пожаров на угольных шахтах и разработка технологии для их минимизации (на примере Кузбасса): дисс. ... канд. техн. наук. Иркутск, 2018. 143 с.
10. Батугин А.С., Кобылкин А.С., Мусина В.Р. Исследование влияния геодинамической позиции угленосных отвалов на их эндогенную пожароопасность // Записки Горного института. 2021. Т. 250. С. 526-533.
11. Журавлева Н.В. Обоснование, разработка и развитие методов оценки влияния добычи и переработки углей Кузнецкого угольного бассейна на экологическое состояние природной среды: дисс. ... докт. техн. наук. М., 2017. 341 с.
12. Расчет параметров анкерного крепления при проведении горных выработок в условиях угольных шахт / С.Б. Алиев, В.Ф. Демин, А.Н. Томилов и др. // Уголь. 2021. №4. С. 15-19. DOI: 10.18796/0041-5790-2021-4-15-19.
13. Оценка эффективности бурения опережающих скважин в области повышенных напряжений массива на газопроявление из угольного пласта / С.Б. Алиев, Р.Р. Ходжаев, Т.К. Исабек и др. // Уголь. 2020. № 11. С. 10–12. DOI: 10.18796/0041-5790-2020-11-10-12.

Original Paper

UDC 622.83:624.131 © S.B. Aliev, R.R. Khodzhayev, B.M. Kenzhin, Yu.M. Smirnov, P.V. Grechishkin, S.T. Assainov, 2022
 ISSN 0041-5790 (Print) • ISSN 2412-8333 (Online) • Ugol' – Russian Coal Journal, 2022, № 9, pp. 61-66
 DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2022-9-61-66>

Title**DETERMINATION OF TEMPERATURE LIMITS OF COAL SELF-IGNITION STAGES****Authors**

Aliev S.B.¹, Khodzhayev R.R.², Kenzhin B.M.², Smirnov Yu.M.², Grechishkin P.V.³, Assainov S.T.²

¹ Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences (IPKON RAS), Moscow, 111020, Russian Federation

² A. Saginov KarTU, Karaganda, 100027, Republic of Kazakhstan

³ VNIMIs Kemerovo Division, Kemerovo, 650040, Russian Federation

Authors information

Aliev S.B., Academician of the National Academy of Sciences, Republic of Kazakhstan, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Senior researcher, e-mail: alsamat@gmail.com

Khodzhayev R.R., Doctor of Engineering Sciences, Professor, e-mail: nicgeomark@mail.ru

Kenzhin B.M., Doctor of Engineering Sciences, Professor, e-mail: kbmz@mail.ru

Smirnov Yu.M., Doctor of Engineering Sciences, Professor, e-mail: smirnov_y_m@mail.ru

Grechishkin P.V., PhD (Engineering), e-mail: pv_grechishkin@mail.ru

Assainov S.T., PhD (Engineering), e-mail: nicgeomark@mail.ru

Abstract

The objective of creating safe working conditions in coal mines can be classified as very challenging and multifactorial. The normative document base in the field of mining safety must be constantly updated and revised, taking into account the results of research conducted by research organizations. Issues related to gas and fire safety issues, gas- and geo-dynamic phenomena, rock pressure are particularly relevant.

The article considers one of the aspects of safe working conditions, namely, fire safety. The analysis of methods for predicting endogenous processes has been performed, the results of experiments aimed at determining the criterion signs of self-heating stages in coal mines of the Karaganda coal basin are presented.

Keywords

Fire safety, Endogenous fire, Chemical activity of coals, Low-temperature oxidation, Self-ignition, Unsaturated hydrocarbons, Mined-out space, Isolated area.

References

1. Instructions on prevention and extinguishing of endogenous fires in the coal enterprises of the Coal Department of «ArcelorMittal Temirtau» JSC. Karaganda, «Engineering Research Center «GeoMark» LLP Publ., 2018, 108 p. (In Russ.).
2. Guidelines for monitoring the occurrence of endogenous fires in the mines of the Coal Department of «ArcelorMittal Temirtau» JSC. Karaganda, Kazakh State Research Institute for Mining Safety Publ., 2009, 36 p. (In Russ.).
3. Grekov S.P., Pashkovskiy P.S. & Orlikova V.P. Determination of coal self-heating temperature by the ratio of carbon monoxide and oxygen loss at the emergency site. *BEZPIECZENSTWO I TECHNIKA POZARNICZA*, 2015, (3), pp. 119-127. (In Russ.).

4. Moria R., Balusu R., Tanguturi K. & Khanal M. Prediction and control of spontaneous combustion in thick coal seams. 13th Coal Operators' Conference, University of Wollongong, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy & Mine Managers Association of Australia, 2013, pp. 232-239.

5. Shlapakov P.A., Kolykhanov V.V. & Khaimin S.A. Gas analytical method for detecting underground fires in coal mines. *Bulletin of the Research Center of VostNII*, 2017, (1), pp. 14-18. (In Russ.).

6. Govor R.A. Technological and technical solutions for preventing and extinguishing endogenous fires in the mines of "Coal Company "Yuzhkuzbassgol". *Zapiski gornogo instituta*, 2006, Vol. 167, (2), pp. 89-92. (In Russ.).

7. Puchkov L.A., Kaledina N.O. & Kobylkin S.S. Aerodynamic method of prevention of endogenous fire hazard in mined-out spaces of coal mines. Moscow, MGSU Publ., 2012, pp. 302-311. (In Russ.).

8. Grekov S.P. & Orlikova V.P. A comprehensive assessment of the endogenous fire hazard of a coal stockpile in a mine. *Pozharnaya i tekhnosfernaya bezopasnost: problemy i puti sovershenstvovaniya*, 2020, (3), pp. 120-125. (In Russ.).

9. Lugovtsova N.Yu. Assessment of environmental risks from endogenous fires in coal mines and the development of technology to minimize them (on the example of Kuzbass): thesis. PhD eng. sci. diss. Irkutsk, 2018, 143 p. (In Russ.).

10. Batugin A.S., Kobylkin A.S. & Musina V.R. Study of influence of geo-dynamic position of coal dumps on their endogenous fire hazard. *Zapiski gornogo instituta*, 2021, (250), pp. 526-533. (In Russ.).

11. Zhuravleva N.V. Rationale and development of methods for assessing the impact of coal mining and processing in the Kuznetsk coal basin on the environmental condition: thesis. Dr. eng. sci. diss. Moscow, 2017, 341 p. (In Russ.).

12. Aliev S.B., Demin V.F., Tomilov A.N. & Miletchenko N.A. Calculation of bolting parameters for coal mine development. *Ugol'*, 2021, (4), pp. 15-19. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2021-4-15-19.

13. Aliev S.B., Hodzhaev R.R., Isabek T.K., Demin V.F. & Shontaev A.Zh. Efficiency assessment of relief hole drilling in areas of high stresses to release methane from coal beds. *Ugol'*, 2020, (11), pp. 10-12. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2020-11-10-12.

For citation

Aliev S.B., Khodzhayev R.R., Kenzhin B.M., Smirnov Yu.M., Grechishkin P.V. & Assainov S.T. Determination of temperature limits of coal self-ignition stages. *Ugol'*, 2022, (9), pp. 61-66. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2022-9-61-66.

Paper info

Received July 13, 2022

Reviewed July 26, 2022

Accepted August 25, 2022