

## НАУКИ О ЗЕМЛЕ

УДК 622.8:662.642

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПРОЦЕССОВ САМОВОЗГОРАНИЯ БУРЫХ УГЛЕЙ****Громыка Д.С., Кремчев Э.А.***ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», Санкт-Петербург,  
e-mail: poloronta@yandex.ru*

Открытая разработка пластовых месторождений полезных ископаемых характеризуется значительным уровнем негативного воздействия на атмосферный воздух, источниками которого могут быть как природные, так и техногенные явления. При оценке экологической нагрузки многие авторы зачастую не принимают во внимание явление эндогенного самовозгорания угля, которое может привести к выделению в атмосферу различных токсичных веществ. В случаях несовершенства системы контроля за данным процессом и несвоевременным принятием противопожарных мер процесс самовозгорания может стать причиной возникновения катастрофических последствий. Особенно остро данная проблема проявляется на объектах, выведенных из эксплуатации, где, в результате отсутствия наблюдения за состоянием очагов горения в пластах и насыпях, происходит бесконтрольный рост температуры в очаге с образованием пожара, площадь которого ежедневно увеличивается. Подобная ситуация наблюдается в зоне влияния буроугольного разреза «Коркинский», где уже более 25 лет наблюдаются очаги эндогенного горения бурого угля. В связи с выводом разреза из эксплуатации необходима разработка мероприятий по его рекультивации, включающих комплекс работ по изоляции очагов эндогенного горения. Проведение данных работ на современном уровне требует создания математической модели процесса, обеспечивающей всестороннее изучение основных параметров процесса самовозгорания, а также оценки интенсивностей выделения основных пожарных газов при разных температурах. В данной работе представлены результаты анализа опыта проведения экспериментальных исследований процессов самовозгорания бурого угля, послуживших основой для создания экспериментальной установки по исследованию процессов самовозгорания и эндогенного горения бурых углей Коркинского разреза.

**Ключевые слова:** Коркинский разрез, эндогенная пожароопасность, эндогенный пожар, самовозгорание угля, пожарные индикаторные газы

**THE APPLICABILITY OF LIGNITE SPONTANEOUS COMBUSTION PROCESS IDENTIFICATION METHODS REVIEW****Gromyka D.S., Kremchev E.A.***Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, e-mail: poloronta@yandex.ru*

Strip mining of mineral deposits can have a significant environmental impacts on the atmosphere, which can be technological or natural. While making an environmental impact assessment, many authors disregards coal endogenic spontaneous combustion process, which can lead to emission of toxic constituents. Self-combustion of coal may cause environmental disaster in cases when this process is controlled inadequately or when fire-preventing measures are taken tardily. This problem is particularly acute for retired facilities where uncontrolled rise of the fire source's temperature is taken place as a result of the absence of stockpiles and dumps fire hazard control. Area of those fires extends on a day-to-day basis. Similar situation is presented on Korkinsk's coal mine zone of influence where lignite endogenic combustion sources are observed over the period of 25 years. Due to coal mine in coming retirement, the preparation of its reclamation measures, including endogenic sources isolation is requisite. However, the implementation of this measures is impossible if the advance research of key parameters of self-combustion processes is not conducted, as well as its mathematical model creation and fire gases key compounds different temperature emission analysis. In this article, results of current experience of lignite spontaneous combustion processes experimental researches conduction are presented. This researches may serve as the basis of experimental facility development, which will be used to analyze Korkinsk coal mine lignite.

**Keywords:** Korkinsk coal mine, endogenic fire hazard, endogenic fire, self-combustion of coal, fire indication gases

Еще с начала XVII века многие ученые занимались изучением причин самовозгорания угля. Многие ученые связывают активизацию данного процесса с каким-то определенным фактором: содержанием в углях пирита, фенолов, бактерий и т.д.; другие ученые используют комплексный подход.

По результатам исследований последних лет [1–4], параметры, определяющие эндогенную пожароопасность, делят на природные и горно-технические. Основным природным фактором является химическая

активность угля к кислороду, а факторы, влияющие на данный параметр, делят на интенсивные (зольность, влажность, теплопроводность, содержание пирита и др.) и экстенсивные (толщина пласта, горное давление и др.). К горно-техническим факторам относят скорость отработки, способ управления кровлей и т.д. [3]. Однако для каждого конкретного месторождения число таких факторов, равно как и количественная оценка степени их влияния на эндогенную пожароопасность, различно, что не

позволяет создать обобщенную модель развития процессов самовозгорания и эндогенного горения.

В связи с отсутствием единого подхода и разрозненностью сведений относительно динамики процессов самонагрева и самовозгорания, в условиях высокой востребованности этих данных, необходимыми видятся новые поисковые исследования.

### Материалы и методы исследования

С точки зрения термодинамики процесса самовозгорания, выделяют 3 стадии его протекания: стадия низкотемпературного окисления, стадия самонагрева и стадия самовозгорания [4, 5]. При изучении процесса самовозгорания обычно рассматривается только фаза самонагрева. Эта стадия является самой ранней стадией эндогенного пожара, ее продолжительность определяется инкубационным периодом, то есть отрезком времени, за который температура угля изменится от естественной до критической температуры самонагрева (КТС). Под КТС угля понимают предельное значение температуры в очаге, при достижении которой процесс самонагрева принимает необратимый характер и переходит в возгорание [6].

Для определения продолжительности инкубационного периода существуют как экспериментальные, так и аналитические методы. Так, в работе [7] представлена аналитическая модель для расчета продол-

жительности инкубационного периода, включающая определение константы скорости сорбции кислорода углем в зависимости от ряда параметров: температуры, размера частиц, относительной влажности, времени протекания реакции и степени дезактивации угля во времени. График зависимости, полученный с использованием предложенной модели, представлен на рис. 1. По итогам исследования [7] был сформулирован вывод, что конец инкубационного периода самовозгорания угля можно рассматривать не как достижение КТС, а как достижение им критической влажности, при которой происходит резкое увеличение константы скорости сорбции кислорода углем и, как следствие, быстрый рост температуры угля.

Похожая модель описывается и в методике расчета инкубационного периода самовозгорания угля, приведенной в приказе Ростехнадзора № 680 [8]. В данной методике продолжительность инкубационного периода определяется по формуле

$$\tau_{\text{инк}} = \sum \frac{\Delta T}{Q_{\text{ген.}} - Q_{\text{вып.}} - Q_{\text{исп.}}}, \text{ сут.} \quad (1)$$

где  $\Delta T$  – изменение температуры скопления угля за единичный отрезок времени, К;  $Q_{\text{ген.}}$  – скорость генерации тепла при взаимодействии кислорода с углем, град/с;  $Q_{\text{вып.}}$  – скорость выноса тепла воздухом, град/с;  $Q_{\text{исп.}}$  – скорость выноса тепла за счет испарения, град/с.

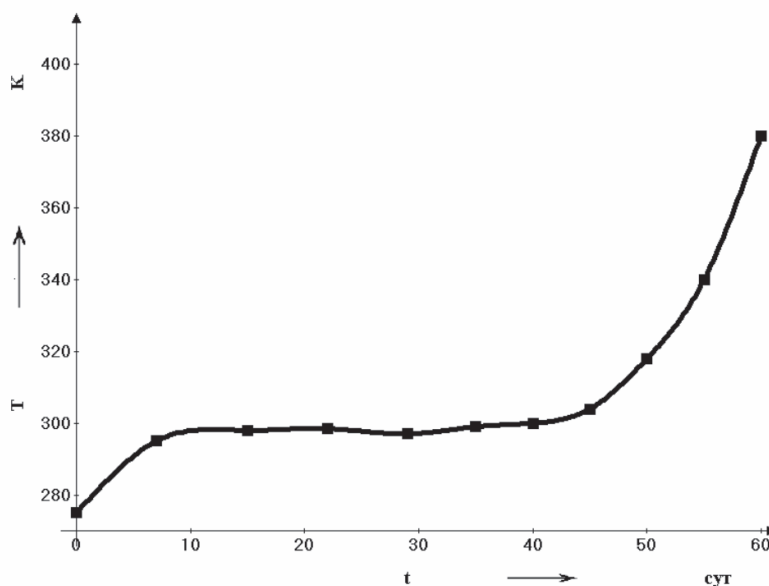


Рис. 1. График расчета инкубационного периода при влажности подаваемого воздуха 100% [7]

В этом же документе представлена экспериментально-аналитическая модель определения константы скорости сорбции кислорода углем. В сорбционные сосуды при температуре 18–20 °С загружается исследуемый уголь фракции 1–3 мм, массой от 50 до 120 г. Сосуды герметично закрываются и термостатируются при температуре 10–20 °С. Через определенные промежутки времени (1, 3 и 5 сут.) из сосудов отбираются пробы и определяется в них убыль кислорода.

Константа скорости определяется по формуле

$$K_c = -\frac{V}{H} \cdot \ln \frac{(100 - C_0) * C_k}{C_0 * (100 - C_k)}, \quad (2)$$

где  $V$  – объем воздуха в сосуде, м<sup>3</sup>;  $H$  – масса навески угля, кг;  $C_0$  – начальная концентрация кислорода, %;  $C_k$  – конечная концентрация кислорода, %.

Следует отметить, что экспериментальные методы оценки параметров процесса самонагрева угля основаны на различных видах его анализа. В источнике [9] предложено классифицировать такие методы, разделив на 4 группы:

1) классические методы, основывающиеся на определении скорости нагревания при адиабатических условиях;

2) термические методы, в основе которых лежит анализ потерь массы при нагревании угля при разных скоростях (при реализации данных методов в качестве приборной базы чаще всего применяют термогравиметрические анализаторы и дифференциальные сканирующие спектрометры ТГА-ДСК);

3) методы анализа энергии активации;

4) изотермические методы, использующиеся чаще всего для определения температуры самонагрева угля.

В работе [10] представлена экспериментальная модель, относящаяся к первой группе методов анализа из приведенных в классификации. В данном исследовании изучалась зависимость достигаемой степени конверсии от зольности углей разных месторождений. В работе было установлено, что величина конверсии линейно уменьшается при росте зольности угля при условии, что доля углерода в сростках пропорциональна зольности.

В другом исследовании [11] проведён анализ влияния влажности на скорость температурного окисления угля при его хранении посредством анализа ИК-спектров навесок углей, подвергавшихся окислению

атмосферным воздухом. Экспериментально установлено, что изменение степени окисленности угля при экспозиции кислородом в сухой атмосфере при длительном хранении (более 5 месяцев) больше, чем при экспозиции во влажной атмосфере.

Первая группа методов часто используется для определения скорости роста температуры, а также продолжительности инкубационного периода. Например, в работе [9] описывается так называемая R70 модель, которая позволяет оценить среднюю скорость процесса самонагрева в диапазон температур от 40 до 70 °С. При этом экспериментальным путем получают график зависимости, отражающий изменение температуры угля во времени (рис. 2).

Термические методы анализа позволяют оценить величину потери массы при различных скоростях нагрева, а также исследовать химические процессы, протекающие при температурах, при которых происходит потеря массы. Например, в работе [12] приведены графики потери массы бурых углей месторождения в штате Гуджарат, Индия. В ходе работы установлено, что величина энергии активации угля падает при росте скорости нагрева.

Помимо кинетических исследований, оцениваются параметры процессов выделения индикаторных пожарных газов при повышении температуры очага самонагрева угля. Подобные исследования в нашей стране чаще всего применяются для торфяных месторождений [13]. Широкая распространенность данного полезного ископаемого на территории России и ряд проблем, проявившихся в последние годы в связи с сокращением объемов добычи и выводом большого числа участков из эксплуатации, требуют разработки научно обоснованных, комплексных мероприятий по снижению пожароопасности. Результаты исследований, представленные в работе [14], указывают, что при нагревании торфа до температуры 250 °С в атмосферу выделяются такие газы, как монооксид и диоксид углерода, фенолы, кислородсодержащие соединения. В этом же источнике указывается на зависимость полноты выхода указанных газов от температуры торфа. Таким образом, газовый мониторинг участков торфяных месторождений может стать основой для объективной идентификации эндогенного пожара на ранней стадии с оценкой температурных интервалов в очаге на основе качественной идентификации и количественного анализа индикаторных газов.

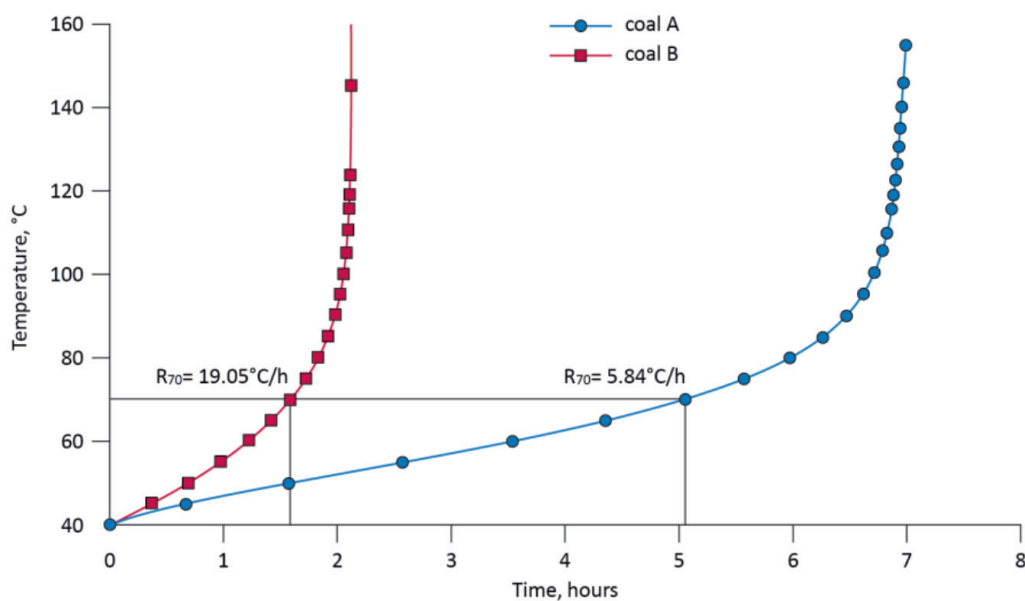


Рис. 2. Кривая самонагревания двух видов угля по модели R70 [9]

Значения индикаторных коэффициентов, полученных в ходе газометрического анализа [16]

Temperature (°C)	47,80	65,40	85,20	105,80	129,60	154,70	173,50	211,00
O <sub>2</sub> deficiency	0,18	0,34	0,96	3,16	6,79	13,79	19,42	20,47
Graham's ratio	1,10	1,50	1,78	2,20	3,13	4,23	6,27	9,11
Morris ratio	5,34	11,60	18,00	24,04	23,23	19,66	14,08	9,46
CO/O <sub>2</sub> ratio	0,03	0,06	0,08	0,13	0,19	0,22	0,24	0,25
Young's ratio	0,27	0,23	0,20	0,16	0,16	0,18	0,25	0,36

В ряде работ [15–17] предлагается проводить оценку интенсивности роста концентрации угарного газа и уменьшения концентрации кислорода в зависимости от температуры очага самовозгорания. Авторами были использованы следующие критерии, служащие для индикации и прогнозирования параметров процесса самовозгорания: коэффициент Грэхема  $\left(\frac{100 \cdot \text{CO}}{O_{def}}\right)$ , варьируется от 0,4 при нормальном состоянии до 3,0 – в зоне активного горения); коэффициент Юнга  $\left(\frac{\text{CO}_2}{O_{def}}\right)$ , а также коэффициент Морриса  $\left(\frac{N_{excess}}{\text{CO}_2 + \text{CO}}\right)$ .

Примечание: CO – концентрация угарного газа в воздухе, %; O<sub>def</sub> – уменьшение концентрации кислорода в воздухе, %; CO<sub>2</sub> –

концентрация углекислого газа в воздухе, %; N<sub>excess</sub> – прирост концентрации азота по сравнению с фоновыми значениями, %.

Экспериментально были получены сведения о содержании индикаторных газов при различных температурах, а также значения приведенных коэффициентов (таблица).

Указанный метод газового анализа нашел широкое применение в Австралии, где существует рабочая модель СВЗ, использующаяся для анализа газового состава и определения температуры очага [18]. В методе используется расчетная оценка индикаторных коэффициентов, а концентрации исследуемых газов определяются с помощью газового хроматографа (пробоподготовка проводится так же как для теста R70).

Исследование концентрации индикаторных пожарных газов часто проводится в нашей стране для локации очагов эндогенных пожаров при подземной разработке угля. Методы газового мониторинга эндогенной

пожароопасности можно встретить во многих отечественных исследованиях [7, 19]. Суть методов заключается в исследовании зависимости определенного параметра газового состава (влажности, концентрации угарного газа, метана, аэрозоля) от температуры очага подземного пожара. Так как проведенные авторами исследования концентраций общепринятых пожарных газов оказались неудовлетворительны вследствие незначительного изменения их концентраций при температурах ниже КТС, то в некоторых исследованиях в качестве анализируемого параметра предлагается определение концентрации радона [20].

Также перспективным направлением обнаружения очагов самовозгорания является применение геофизических методов [21, 22]. Сущность методов заключается в применении дипольного электропрофилеирования и дипольного электропросвечивания штабелей угля. При реализации данного метода электрическое поле создается и регистрируется синхронно перемещаемыми питающим и измерительным диполями, расположенными в разных выработках и ориентированными по высоте выработки [21, 22].

Помимо электроразведки используются и другие физические методы, например оптические и термоакустоэмиссионные [23, 24]. Суть методов заключается в регистрации акустической эмиссии в образце при его нагревании. Так, по результатам исследования [24] была предложена классификация термальной устойчивости углей в зависимости от коэффициента термальной деструкции.

Как обобщение результатов вышеперечисленных методов, а также в качестве самостоятельной группы методов, выступает многомерная классификация. Применение данной методики описано в источнике [25]. В работе были определены эталонные значения параметров, влияющих с различной степенью (вес признака) на эндогенную пожароопасность. По отклонению параметров от эталонных, предложено ранжировать угли по степени опасности самовозгорания.

#### **Результаты исследования и их обсуждение**

Выполненный обзор существующих методов исследования процессов самонагрева и эндогенного горения бурого угля различных месторождений позволил оценить возможность применения ранее разработанных методов для реализации более де-

тальных экспериментальных исследований бурого угля Коркинского разреза.

Для получения предварительных сведений о продолжительности инкубационного периода нами было принято решение воспользоваться методикой, приведенной в [7, 8]. Опираясь на материалы исследований качественных характеристик угля Челябинского угольного бассейна [26], влажность угля была принята равной 17%, начальная и критическая температуры – 12 и 60 °С соответственно.

Оценка технических возможностей приборной базы Горного университета, и состав экспериментальных установок, описанных в [6, 9, 12], позволили предложить для оценки параметров углей проведение эксперимента по методике, приведенной в [12], с использованием TGA-анализатора, обеспечивающего контроль термического режима при скорости нагрева менее 6 °С/мин, и дополнительно соединенным с модулем ДСК, для анализа термических эффектов при основных химико-термических преобразованиях угля. В соответствии с результатами, полученными в работах [6, 14, 16, 20], ожидается обнаружение следующих индикаторных пожарных газов: радон, угарный газ, водород, фенолы, углекислый газ. Также для прогнозирования самовозгорания следует использовать коэффициенты-индикаторы, описанные в работе [16].

#### **Заключение**

Проведенные обзорные исследования по методам оценки параметров процессов эндогенного горения позволили разработать план экспериментальных исследований, суть которых заключается в моделировании условий самонагрева бурого угля Коркинского разреза, с оценкой качественного и количественного составов выделяющихся пожарных газов.

В результате планируемого эксперимента ожидается получить зависимости значений концентраций пожарных газов от температуры источника эндогенного горения, на основе которых, опираясь на результаты исследований кинетики процесса, будет проведена оценка продолжительности времени достижения критических значений температуры очага саморазогревания. Эти данные в дальнейшем позволят обоснованно выстраивать логику комплекса горно-технических мероприятий по локализации и ликвидации очагов самовозгорания угля на Коркинском буроугольном разрезе, что не только улучшит экологическую ситуа-

цию в районе воздействия открытой горной выработки, но и обеспечит возможность проведения работ по ликвидации и техническому этапу рекультивации открытой горной выработки.

### Список литературы

1. Ерастов А.Ю. Влияние горного давления на возникновение очагов самовозгорания угля в выработанных пространствах выемочных участков / А.Ю. Ерастов // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности – 2013. – № 1.1 – С. 5–8.
2. Минеральные и валентные формы железа и их влияние на окисление и самовозгорание углей / В.В. Коровушкин [и др.] // Горный журнал. – 2015. – № 11. – С. 70–74.
3. Сидоренко А.А. Эндогенная пожароопасность шахт Кузбасса / А.А. Сидоренко // Записки Горного института. – 2014. – № 207. – С. 66–69.
4. Торро Т.В. Методика, ход и результаты исследования процесса самовозгорания угля / Т.В. Торро, А.В. Ремезов, Г.Н. Роут // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2016. – № 4. – С. 18–26.
5. Jun Deng, Changkui Lei, Yang Xiao, Kai Cao, Li Ma, Weifeng Wang, Bin Laiwang. Determination and prediction on «three zones» of coal spontaneous combustion in a gob of fully mechanized caving face // Fuel. 2018. Vol. 211. P. 458–470.
6. Выделение индикаторных пожарных газов при окислении угля на стадиях самонагревания и беспламенного горения / В.Г. Игишев [и др.] // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2015. – № 4. – С. 55–59.
7. Ворошилов А.С. Моделирование самонагревания угля с учетом дезактивации и влияния изменения влажности угля / А.С. Ворошилов // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2011. – № 1. – С. 123–130.
8. Приказ Ростехнадзора от 01.12.2011 № 680 (ред. от 08.08.2017) «Об утверждении Инструкции по применению схем проветривания выемочных участков шахт с изолированным отводом метана из выработанного пространства с помощью газоотсасывающих установок» (Зарегистрировано в Минюсте России 29.12.2011 № 22815). URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_125667](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_125667) (дата обращения: 24.05.2018).
9. Dr L.L. Sloss. Assessing and managing spontaneous combustion of coal. UK: IEA Clean Coal Centre, 2015, 55 с.
10. Чернявский Н.В. Характер выгорания коксов энергетических углей различной зольности в кипящем слое / Н.В. Чернявский, А.Ю. Майстренко, И.И. Голенко // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2009. – № 3. – С. 4–11.
11. Патраков Ю.Ф. Изменение химического состава и поверхностных свойств при атмосферном окислении угля / Ю.Ф. Патраков, С.А. Семенова, А.С. Усанина // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2017. – № 2. – С. 131–139.
12. Vimal R. Patel, Rajesh N. Patel, Vandana J. Rao. Kinetic parameter estimation of lignite by thermo-gravimetric analysis // Procedia Engineering. 2013. Vol. 51. P. 727–734.
13. Kremcheev E.A., Nogornov D.O. Environmentally Compatible Technology of Peat Extraction // Life Science Journal. 2014. Vol.11. P. 453–456.
14. Misnikov, O.S., Dmitriev, O.V., Popov, V.I. et al. The use of peat-based water repellants to modify fire-extinguishing powders // Polym. Sci. Ser. D. 2016. Vol. 9. P. 133.
15. Греков С.П. Определение температуры самонагревания угля по соотношению оксида углерода и убыли кислорода на аварийном участке / С.П. Греков, П.С. Пашковский, В.П. Орликова // BEZPIECZENSTWO I TECHNIKA POZARNICZA. – 2015. – № 3. – С. 119–127.
16. 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. P. 232–239.
17. Tao Xu. Heat effect of the oxygen-containing functional groups in coal during spontaneous combustion processes // Advanced Powder Technology. 2017. Vol. 28 (8). P. 1841–1848.
18. Beamish B., Beamish R. Testing and sampling requirements for input to spontaneous combustion risk assessment // Proceedings of The Australian Mine Ventilation Conference. 2012. Vol. 1. P. 15–21.
19. Портола В.А. Обнаружение процесса самонагревания угля по содержанию жидкого аэрозоля / В.А. Портола, С.Н. Лабукин // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2010. – № 2. – С. 14–19.
20. Контроль очагов самовозгорания на угольных шахтах с помощью измерения плотности потока радона / Г.И. Коршунов [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень (Научно-технический журнал). – 2012. – № 6. – С. 194–196.
21. Опыт применения геофизической съемки и тепловизионного контроля для выявления очагов самонагревания на угольных складах и выбора способа их тушения / А.Ю. Ерастов [и др.] // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2012. – № 2. – С. 152–156.
22. Пат. 2340002 Российская Федерация, МПК G08B 17/117 G08B 25/10. Способ раннего обнаружения пожара и устройство для его реализации. / Дикарев В.И.; заявитель и патентообладатель: Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского. – № 2007130046/09; заявл. 06.08.2007; опубл. 27.11.2008; бюл. № 33.
23. Нестерова В.Г. Об использовании оптического и термоакустэмиссионного методов для оценки окисленности ископаемых углей / В.Г. Нестерова, К.Е. Пономарев, Ю.С. Бахтина // Горный информационно-аналитический бюллетень (Научно-технический журнал). – 2011. – № 4. – С. 180–187.
24. Novikov E.A., Oshkin R.O., Shkuratnik V.L., et al. Application of thermally stimulated acoustic emission method to assess the thermal resistance and related properties of coals. 2018 // International Journal of Mining Science and Technology [electronic source] – mode of access: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095268617308959> (date of access: 16.03.2018).
25. Голынская Ф.А. Применение метода многомерной классификации по эталонным точкам для определения степени самовозгораемости бурых углей / Ф.А. Голынская, О.С. Смирнова, Р.А. Никонов // Новые идеи в геологии нефти и газа – 2017: сборник научных трудов (по материалам Международной научно-практической конференции). Отв. редактор А.В. Ступакова. – 2017. – С. 67–71.
26. Смолин Д.В. Анализ качества бурых углей и возможности их сжигания на ТЭЦ Челябинской области / Д.В. Смолин, Л.Е. Лымбина // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2017. – № 1. – С. 206–210.

### References

1. Erastov A.Yu. Vliyanie gornogo davleniya na vozniknovenie ochagov samovozgoraniya uglya v vy`rabotanny`x prostranstvax vy`emochny`x uchastkov / A.Yu. Erastov // Vestnik nauchnogo centra po bezopasnosti rabot v ugol'noj promy`shlennosti – 2013. – № 1.1 – P. 5–8.
2. Mineral'ny`e i valentny`e formy` zheleza i ix vliyanie na okislenie i samovozgoranie uglej / V.V. Korovushkin [i dr.] // Gornyj zhurnal. – 2015. – № 11. – P. 70–74.
3. Sidorenko A.A. E`ndogennaya požharopasnost` shaxt Kuzbassa / A.A. Sidorenko // Zapiski Gornogo instituta. – 2014. – № 207. – P. 66–69.

4. Torro T.V. Metodika, hod i rezul'taty` issledovaniya processa samovozgoraniya uglya / T.V. Torro, A.V. Remezov, G.N. Rout // Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2016. – № 4. – P. 18–26.
5. Jun Deng, Changkui Lei, Yang Xiao, Kai Cao, Li Ma, Weifeng Wang, Bin Laiwang. Determination and prediction of «three zones» of coal spontaneous combustion in a gob of fully mechanized caving face // Fuel. 2018. Vol. 211. P. 458–470.
6. Vy`delenie indikatorny`x pozharny`x gazov pri okislenii uglya na stadiyax samonagrevaniya i besplamennogo goreniiya / V.G. Igishev [i dr.] // Vestnik nauchnogo centra po bezopasnosti rabot v ugol'noj promy'shlennosti. – 2015. – № 4. – P. 55–59.
7. Voroshilov A.S. Modelirovanie samonagrevaniya uglya s uchetom dezaktivacii i vliyaniya izmeneniya vlazhnosti uglya / A.S. Voroshilov // Vestnik nauchnogo centra po bezopasnosti rabot v ugol'noj promy'shlennosti. – 2011. – № 1. – P. 123–130.
8. Prikaz Rostekhnadzora ot 01.12.2011 № 680 (red. ot 08.08.2017) «Ob utverzhdenii Instrukcii po primeneniyu sxem provetrivaniya vy'emochny`x uchastkov shaxta s izolirovanny`m otvodom metana iz vy`rabortannogo prostranstva s pomoshh'yu gazootsasy`vayushhix ustanovok» (Zaregistrovano v Minyuste Rossii 29.12.2011 № 22815). URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_125667](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_125667) (date of access: 24.05.2018).
9. Dr L.L. Sloss. Assessing and managing spontaneous combustion of coal. UK: IEA Clean Coal Centre, 2015, 55 s.
10. Chernyavskij N.V. Karakter vy`goraniya koksov e`nergeticheskix uglej razlichnoj zol'nosti v kipiyashhem sloe / N.V. Chernyavskij, A.Yu. Majstrenko, I.L. Golenko // E`nergotekhnologii i resursoberezhenie. – 2009. – № 3. – P. 4–11.
11. Patrakov Yu.F. Izmenenie ximicheskogo sostava i poverxnostny`x svojstv pri atmosfernom okislenii uglya / Yu.F. Patrakov, S.A. Semenova, A.S. Usanina // Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2017. – № 2. – P. 131–139.
12. Vimal R. Patel, Rajesh N. Patel, Vandana J. Rao. Kinetic parameter estimation of lignite by thermo-gravimetric analysis // Procedia Engineering. 2013. Vol. 51. P. 727–734.
13. Kremcheev E.A., Nogornov D.O. Environmentally Compatible Technology of Peat Extraction // Life Science Journal. 2014. Vol.11. P. 453–456.
14. Misnikov, O.S., Dmitriev, O.V., Popov, V.I. et al. The use of peat-based water repellants to modify fire-extinguishing powders // Polym. Sci. Ser. D. 2016. Vol. 9. P. 133.
15. Grekov S.P. Opredelenie temperatury` samonagrevaniya uglya po sootnosheniyu oksida ugleroda i uby`li kisloroda na avarijnom uchastke / S.P. Grekov, P.S. Pashkovskij, V.P. Orlikova // BEZPIECZENSTWO I TECHNIKA POZARNICZA. – 2015. – № 3. – P. 119–127.
16. 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. P. 232–239.
17. Tao Xu. Heat effect of the oxygen-containing functional groups in coal during spontaneous combustion processes // Advanced Powder Technology. 2017. Vol. 28 (8). P. 1841–1848.
18. Beamish B., Beamish R. Testing and sampling requirements for input to spontaneous combustion risk assessment // Proceedings of the Australian Mine Ventilation Conference. 2012. Vol. 1. P. 15–21.
19. Portola V.A. Obnaruzhenie processa samonagrevaniya uglya po sodержaniyu zhidkogo ae`rozolya / V.A. Portola, S.N. Labukin // Izvestiya vy`sshix uchebny`x zavedenij. Gornyj zhurnal. – 2010. – № 2. – P. 14–19.
20. Kontrol' ochagov samovozgoraniya na ugol'ny`x shaxtax s pomoshh'yu izmereniya plotnosti potoka radona / G.I. Korshunov [i dr.] // Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (Nauchno-tekhnicheskij zhurnal). – 2012. – № 6. – P. 194–196.
21. Opyt primeneniya geofizicheskogo s`emki i teplovizionnogo kontrolya dlya vy`yavleniya ochagov samonagrevaniya na ugol'ny`x skladox i vy`bora sposoba ix tusheniya / A.Yu. Erastov [i dr.] // Vestnik nauchnogo centra po bezopasnosti rabot v ugol'noj promy'shlennosti. – 2012. – № 2. – P. 152–156.
22. Pat. 2340002 Rossijskaya Federaciya, MPK G08B 17/117 G08B 25/10. Sposob rannego obnaruzheniya pozhara i ustrojstvo dlya ego realizacii. / Dikarev V.I.; zayavitel' i patentoobladatel': Voenno-kosmicheskaya akademiya im. A.F. Mozhajskogo. – № 2007130046/09; zayavl. 06.08.2007; opubl. 27.11.2008; byul. № 33.
23. Nesterova V.G. Ob ispol'zovanii opticheskogo i termoakustoe`missionnogo metodov dlya ocenki okislenosti iskopaemy`x uglej / V.G. Nesterova, K.E. Ponomarev, Yu.S. Baxtina // Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (Nauchno-tekhnicheskij zhurnal). – 2011. – № 4. – P. 180–187.
24. Novikov E.A., Oshkin R.O., Shkuratnik V.L., et al. Application of thermally stimulated acoustic emission method to assess the thermal resistance and related properties of coals. 2018 // International Journal of Mining Science and Technology [electronic source] – mode of access: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095268617308959> (date of access: 16.03.2018).
25. Goly`nskaya F.A. Primenenie metoda mnogomernoj klassifikacii po e`talonny`m tochkam dlya opredeleniya stepeni samovozgoraemosti bury`x uglej / F.A. Goly`nskaya, O.S. Smirnova, R.A. Nikonov // Novy`e idei v geologii nefti i gaza – 2017: sbornik nauchny`x trudov (po materialam Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskij konferencii). Otv. redaktor A.V. Stupakova. – 2017. – P. 67–71.
26. Smolin D.V. Analiz kachestva bury`x uglej i vozmozhnosti ix szhiganiya na TE`Cz Chelyabinskij oblasti / D.V. Smolin, L.E. Ly`mbina // E`nergo- i resursoberezhenie v teploe`nergetike i social'noj sfere: materialy` mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskij konferencii studentov, aspirantov, ucheny`x. – 2017. – № 1. – P. 206–210.