

УДК 504.064

С. П. ВЫСОЦКИЙ^а, Д. А. КОЗЫРЬ^б^а ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», ^б ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет»**КОНТРОЛЬ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОРОДНЫХ ОТВАЛОВ**

Аннотация. В статье проведен анализ развития дистанционных методов и способов контроля породных отвалов. Впервые разработано критериальное уравнение, которое учитывает основные факторы, влияющие на дистанционное измерение температуры очагов самовозгорания на породных отвалах. Исследованиями установлено, что при дистанционном контроле коэффициент теплоотдачи к атмосфере очагов самовозгорания на породных отвалах, образованных при добыче угля высокой стадии метаморфизма (Донецкий бассейн, Подмосковский бассейн) выше, чем на породных отвалах, образованных при добыче угля ранней стадии метаморфизма (Печорский бассейн, Челябинский бассейн). Впервые лабораторными и натурными исследованиями установлено, что температурный контраст обратно пропорционален расстоянию в степени 1,8. В работе предложен метод оценки стадии горения путем измерения отношения концентраций диоксида и оксида углерода и степени превращения O_2 на очагах самовозгорания.

Ключевые слова: породный отвал, самовозгорание, пропускание атмосферы, беспилотные летательные аппараты.

ФОРМУЛИРОВАНИЕ ПРОБЛЕМЫ

В настоящее время в Донецком регионе насчитывается более 600 породных отвалов, из них около 140 горящих. Установлено, что в угледобывающих районах Донбасса горящие породные отвалы шахт и обогатительных фабрик выделяют в сутки в среднем 9,8 т CO , 154,2 т – CO_2 , 1,5 т – SO_2 , 0,4 т – H_2S и 0,072 т $NO + NO_2$. Горящие породные отвалы Донбасса зачастую находятся в черте плотной городской застройки. При их эксплуатации имеют место катастрофические процессы, связанные с взрывным горением воздушно-газовых смесей и так называемыми физическими взрывами, происходящими при поступлении воды в область раскаленных пород [1]. При этом происходили выбросы в атмосферу значительного количества пылевидных частиц, газов, в воздухе формировался фронт ударной волны [2].

Для выявления очагов самовозгорания и своевременного принятия мер по предупреждению самовозгорания пород должен выполняться контроль теплового состояния породных отвалов (не реже 1 раза в год). Результаты измерений температуры используют для определения площади горячей поверхности отвала, необходимой для разработки проектов тушения и установления объемов выбросов вредных веществ.

Для принятия оптимального комплекса мероприятий по предупреждению и ликвидации очагов самовозгорания необходим своевременный мониторинг стадий развития процесса окисления отвалных пород. С развитием пожара расход средств на его тушение значительно увеличивается, важным является своевременно выявить, локализовать и ликвидировать очаг самовозгорания.

Большие возможности по выявлению пожаров породных отвалов на ранних стадиях дает применение дистанционных методов контроля температуры. Выявление очагов тепловыделения может проводиться с использованием тепловизора как в ручном режиме, так и с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Для широкого применения дистанционных средств и способов температурного контроля в настоящее время отсутствуют законодательно утвержденные методики, которые позволяют учитывать условия съемки и влияние внешних факторов на результаты тепловизионной съемки [3].

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Впервые методы дистанционного зондирования для обнаружения и определения местоположения очагов самовозгорания на породных отвалах были применены в США в 1963 году в Скрантоне (штат Пенсильвания). В 60-е и 70-е годы многие американские ученые проводили наблюдения за горящими породными отвалами, используя тепловизионные камеры, размещенные на борту летательных аппаратов. Однако технические возможности тепловизионной техники в тот период давали очень грубую оценку температуры очагов самовозгорания [4, 5]. Методы дистанционного зондирования горящих породных отвалов, основанные на спектральном сканировании в тепловом инфракрасном диапазоне, использовались с 1983 года в угледобывающих районах Китая и Индии, где были получены карты спонтанного нагрева породных отвалов [6, 7]. Анализ состояния породных отвалов с использованием летательных аппаратов и тепловизора был также осуществлен на породных отвалах Польши. Во время воздушной съемки регистрировались термограммы вдоль траектории полета, при этом получалась серия изображений, которые позволили построить термографическую карту района [8].

Вышеприведенные исследования не учитывают условий съемки и влияние внешних факторов на результаты тепловизионной съемки. К основным внешним факторам относятся расстояние от очага самовозгорания до тепловизора, размеры очага самовозгорания, ракурс дистанционной съемки, теплопроводные свойства породы и т. д. Для исследования влияния основных факторов на показатели дистанционных методов контроля были проведены лабораторные и натурные исследования [9].

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЙ

Определение влияния основных факторов на результаты тепловизионной съемки горящих породных отвалов, образованных при добыче угля разных стадий метаморфизма, с использованием беспилотных летательных аппаратов.

ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

Учитывая сложность процессов теплообмена между очагом самовозгорания и средой (породой и атмосферой), для их описания применен метод анализа размерностей с учетом дополнения Хантли. Представим очаг самовозгорания в виде геометрической фигуры с эквивалентным диаметром d (м). Очаг самовозгорания породы, с коэффициентом теплоотдачи за счет теплопроводности α_n (Дж/м²·К·с) и коэффициентом теплопроводности λ_n (Дж/м·К·с), имеет температуру T (К). Тепловой поток Q (Дж/с), проходя через атмосферу с коэффициентом теплоотдачи α_a (Дж/м²·К·с), коэффициентом теплопроводности λ_a (Дж/м·К·с) и скоростью потока воздуха V (м/с), фиксируется тепловизором на расстоянии L (м) с длительностью измерения τ (с) (таблица).

Таблица – Параметры взаимодействия очага тепловыделения с окружающей средой и тепловизором

Параметр	L_x	L_y	L_z	T	Q	τ	n
α_a	–	–	–2	–1	1	–1	1
α_n	–2/3	–2/3	–2/3	–1	1	–1	a
λ_a	–	–	–1	–1	1	–1	b
λ_n	–1/3	–1/3	–1/3	–1	1	–1	c
L	–	–	1	–	–	–	d
D	1/3	1/3	1/3	–	–	–	e
V	1/2	1/2	–	–	–	–1	k

Параметры взаимодействия очага тепловыделения с окружающей средой и тепловизором представим в виде уравнений:

$$-\frac{2}{3}a - \frac{1}{3}c + \frac{1}{3}e + \frac{1}{2}k = 0; \quad (1)$$

$$-\frac{2}{3}a - b - \frac{1}{3}c + d + \frac{1}{3}e = -2; \quad (2)$$

$$a + b + c = 1; \quad (3)$$

$$a + b + c + k = 1. \quad (4)$$

Решив уравнения (1–4), с учетом экспериментальных данных, получим следующие значения степеней уравнения: $a = 0,5$; $b = 0,167$; $c = 0,333$; $d = -1,833$; $e = 1,333$; $k = 0$.

Уравнение коэффициента теплоотдачи примет вид:

$$\alpha_a = \alpha_n^{0,5} \cdot \lambda_a^{0,167} \cdot \lambda_n^{0,333} \cdot L^{-1,833} \cdot d^{1,333}. \quad (5)$$

Критериальное уравнение коэффициента теплоотдачи к атмосфере примет вид:

$$\frac{\alpha_a L}{\lambda_a} = \left(\frac{\alpha_n d}{\lambda_n} \right)^{0,5} \cdot \left(\frac{\lambda_n d}{\lambda_a L} \right)^{0,833}. \quad (6)$$

В уравнении (6) значение критерия Нуссельта атмосферного воздуха (Nu_a), характеризующее отвод тепла излучением, пропорционально квадратному корню из теплоотдачи за счет отвода тепла к породе и соответственно теплопроводных свойств породы и атмосферы.

Угли разной стадии метаморфизма избирательно проявляют интенсивность самовозгорания на разных стадиях горения породных отвалов. Угли высокой стадии метаморфизма характеризуются низким выходом летучих веществ и высокой пористостью, что обуславливает высокую концентрацию кислорода и может свидетельствовать о преобладании стадии химического окисления угля при самовозгорании породных отвалов. Угли низкой стадии метаморфизма характеризуются высоким содержанием влаги, что, предположительно, может указывать влияние на биохимическую стадию окисления угля.

Степень метаморфизма углей влияет на их теплофизические свойства, в частности на теплопроводность. Увеличение плотности углей с ростом степени метаморфизма отражается на их тепловых свойствах. Значение коэффициента теплопроводности увеличивается по мере перехода к газовым углям, с одной стороны, к тощим и антрацитам – с другой [10, 11].

Оценим влияние расстояния дистанционной температурной съемки на коэффициент теплоотдачи к атмосфере при использовании углей разных стадий метаморфизма (рисунок 1).

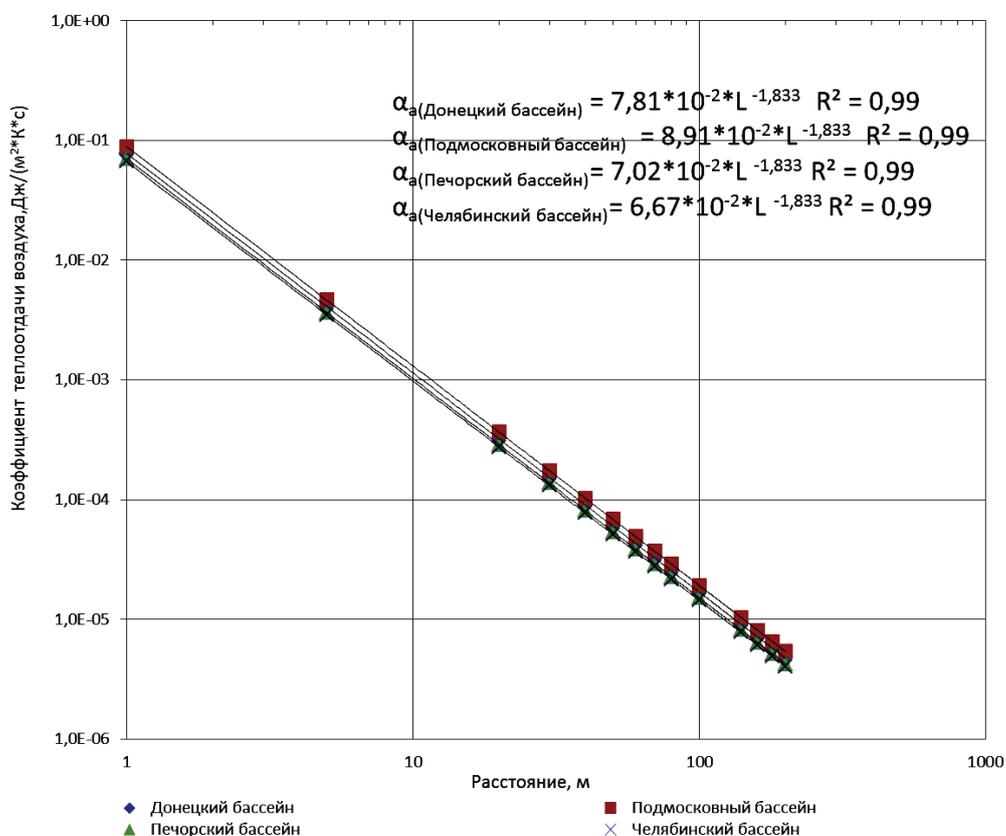


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента теплоотдачи к атмосфере от расстояния между объектом тепловыделения и измерительным устройством.

Установлено, что при тепловизионной съемке породных отвалов, образованных при добыче углей высокой стадии метаморфизма (Донецкий и Подмосковный бассейны), коэффициент теплоотдачи к атмосфере выше, чем при съемке породных отвалов, образованных при добыче углей ранней стадии метаморфизма (Печорский и Челябинский бассейны). При использовании критериального уравнения установлено, что для породных отвалов, образованных при добыче углей высокой стадии метаморфизма (Донецкий и Подмосковный бассейны), расстояние дистанционного контроля больше, чем для породных отвалов, образованных при добыче углей ранней стадии метаморфизма (Печорский и Челябинский бассейны). Так расстояние дистанционного контроля породных отвалов с коэффициентом теплоотдачи к атмосфере $1,08 \cdot 10^{-4}$ Дж/(м²·К·с) для углей Подмосковского бассейна составит 143 м, для углей Донбасса – 133 м, для углей Печорского бассейна 125 м, для углей Челябинского бассейна – 122 м.

Для оценки влияния основных факторов на фиксируемую температуру дистанционного контроля теплового состояния горящих породных отвалов при помощи критериального уравнения и закона Стефана-Больцмана была разработана величина температурного контраста:

$$\alpha_a = \sigma \cdot (T_n^4 - T_a^4); \quad (7)$$

$$\Delta T = T_n - T_a; \quad (8)$$

$$\Delta T = \frac{\left(\frac{\alpha_n d}{\lambda_n}\right)^{0,5} \cdot \left(\frac{\lambda_n d}{\lambda_a L}\right)^{0,833} \cdot \lambda_a}{T_n^3 \cdot \left(1 + \left(\frac{T_a}{T_n}\right)^3 + \left(\frac{T_a}{T_n}\right)^2 + \frac{T_a}{T_n}\right)}. \quad (9)$$

При анализе результатов лабораторных и натуральных исследований установлено, что температурный контраст обратно пропорционален расстоянию в степени 1,8 (рисунок 2).

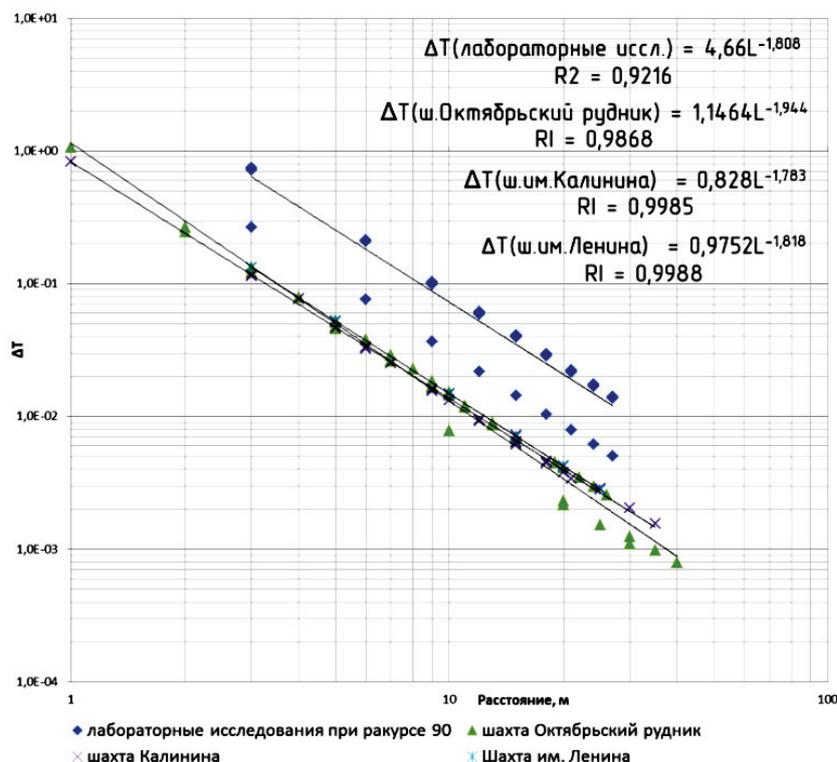


Рисунок 2 – Зависимость температурного контраста ΔT очага самовозгорания от расстояния съемки L , м.

Отличие между температурным контрастом, полученным при натуральных и лабораторных исследованиях, состоит в разных коэффициентах теплопроводности.

Большие возможности по выявлению пожаров породных отвалов на ранних стадиях дает контроль их газового состава [12]. Для изучения газового состава выбросов горящего породного отвала выполнены инструментальные измерения на горящем породном отвале шахты им. Калинина.

При инструментальных измерениях использовалась труба высотой 1,5 м и диаметром 0,15 м, которая позволила снизить влияние турбулентности атмосферы. Измерения газового состава проводились на выявленных с помощью дистанционных методов очагах самовозгорания с учетом требований техники безопасности. Породные отвалы характеризуются непостоянством состава, оценить стадию их окисления по степени горения топлива практически невозможно [13–14]. Критерием оценки стадии окисления породных отвалов является степень превращения кислорода необходимого для горения породного массива.

Стадия окисления очагов самовозгорания оценивалась при помощи отношения измеренных концентраций CO_2/CO и степени превращения O_2 (α_{O_2}) (рисунок 3):

$$\alpha_{\text{O}_2} = \frac{C_{\text{O}_2} - C_{\text{O}_2\text{изм}}}{C_{\text{O}_2\text{изм}}}, \quad (10)$$

где C_{O_2} – средняя концентрация O_2 в воздухе, %;
 $C_{\text{O}_2\text{изм}}$ – измеренная концентрация O_2 в дымовых газах очага самовозгорания, %.

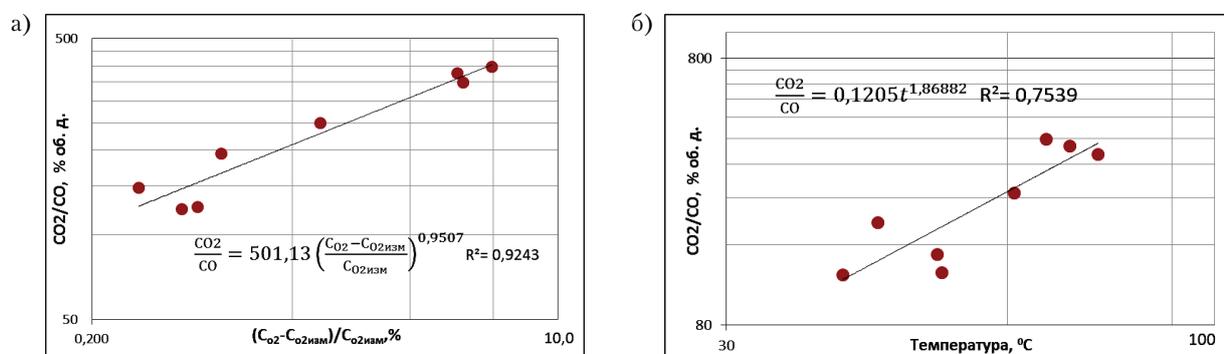


Рисунок 3 – Зависимость изменения концентраций CO_2/CO от степени превращения O_2 (α_{O_2}) (а), от температуры очагов самовозгорания (б).

Исследование использования кислорода воздуха для окисления угля и пиритов породных отвалов определило направление процесса горения. При развитии процесса в очаге повышения температуры в зоне горения энергия активации процесса меньше и активное горение происходит с меньшим избытком кислорода, соответственно степень использования кислорода воздуха больше или, наоборот, при уменьшении температуры в очаге для знаковой реализации процесса требуется больший избыток кислорода или имеет место меньшая степень его окисления. Степень превращения O_2 также определяется отношением CO_2/CO и также характеризует направление процесса окисления. Результаты измерений показали, что по мере окисления породы возрастает концентрация оксида углерода и степень превращения O_2 .

ВЫВОДЫ

1. Впервые разработано критериальное уравнение, которое учитывает основные факторы, влияющие на дистанционное измерение температуры очагов самовозгорания на породных отвалах.
2. Предложен метод оценки стадии горения путем измерения отношения концентраций диоксида и оксида углерода и степени превращения O_2 на очагах самовозгорания.
3. Установлено влияние степени метаморфизма угля на предельное расстояние дистанционного контроля теплового состояния породных отвалов.
4. Установлено, что значение критерия Нуссельта атмосферного воздуха, характеризующее отвод тепла излучением, пропорционально квадратному корню из критерия Нуссельта, характеризующего отвод тепла к породе и, соответственно зависит от теплопроводных свойств породы и атмосферы.
5. Впервые лабораторными и натурными исследованиями установлено, что температурный контраст обратно пропорционален расстоянию в степени 1,8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Uncontrolled coal fires and their environmental impacts: investigating two arid mining regions in north-central China [Text] / C. Kuenzer, J. Zhang, A. P. Tetzlaff, Van Dijk, H. Mehl [and etc.] // Appl. Geogr. – No. 27. – 2007. – P. 42–62.
2. Козырь, Д. А. Усовершенствование методов контроля температуры при обеспечении экологической безопасности породных отвалов угольных предприятий [Текст] / Д. А. Козырь // Проблемы природопользования и экологическая ситуация в Европейской России и на сопредельных территориях : VII Международная научная конференция (памяти проф. А. Н. Петина), Белгород, 24–26 октября 2017 г. : сб. тр. / Мин-во образования и науки РФ [и др.]. – Белгород : Изд-во «ПОЛИТЕРРА», 2017. – С. 339–342. – ISBN 978-5-98242-232-3.
3. Высоцкий, С. П. Мониторинг теплового состояния породных отвалов с использованием дистанционных методов контроля [Текст] / С. П. Высоцкий, Д. А. Козырь // Вестник Академии гражданской защиты. – Донецк : ГОУ ВПО «Академия гражданской защиты» МЧС ДНР, 2018. – Вып. 1(13). – С. 59–69.
4. Coal Waste Impoundments Risks, Responses, and Alternatives Committee on Coal Waste Impoundments, Committee on Earth Resources, Board on Earth Sciences and Resources, Division on Earth and Life Studies National Research Council [Text] : Report 2002. – Washington : National Academy Press, 2002. – 230 p.
5. Manual of coal fire detection and monitoring [Text] / H. Rosema, H. Guan, Z. Veld, Z. Vekerdy [and etc.]. – Delft : Netherlands Institute of Applied Geosciences, 1999. – P. 193–204.
6. Querol, X. Environmental characterization of burnt coal gangue banks at Yangquan, Shanxi Province, China [Text] / X. Querol, M. Izquierdo, E. Monfort, E. Alvarez [and etc.] // International Journal of Coal Geology. – No. 75, 2008. – P. 93–104.
7. Wang, Yun-jia Infrared thermography monitoring and early warning of the spontaneous combustion of coal gangue pile [Text] / Wang Yun-jia, Sheng Yao-bin, Gu Qiang, Yue-yue Sun [and etc.] // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – Vol. XXXVII. Part B8, 2008. – P. 203–206.
8. Wasilewski, S. Mining waste dumps – modern monitoring of thermal and gas activities [Text] / S. Wasilewski, P. Skotniczny // Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management. – 2015. – V. 31(1). – P. 155–182.
9. Козырь, Д. А. Обоснование методики теплового неразрушающего контроля поверхности источников горения и самонагрева на породных отвалах угольных шахт [Текст] / Д. А. Козырь, В. К. Костенко // Проблемы недропользования : Междунар. форум-конкурс молодых ученых, Санкт-Петербург, 20–22 апреля 2016 г. : сборник трудов. Часть 2. / Гор. ун-т. – Санкт-Петербург : [Гор. ун-т]. – 2016. – С. 104–106.
10. Захаров, Е. И. Физико-химические свойства углей и угольных массивов [Текст] / Е. И. Захаров, Н. М. Качурин, И. И. Мохначук // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2012. – Вып. 2. Промышленная безопасность. – С. 58–67. – ISSN 2218-5194.
11. Beamish, B. V. Effect of mineral matter on coal self-heating rate [Text] / B. V. Beamish, A. Arisoy // Fuel. – 2008. Vol. 87. – P. 125–130.
12. Mohalik, N. K. Review of experimental methods to determine spontaneous combustion susceptibility of coal – Indian context [Text] / N. K. Mohalik, Edward Lester, Ian Lowndes // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. – 2016, Vol. 31(5). – P. 301–332.
13. Wang, H. Coal oxidation at low temperatures: oxygen consumption, oxidation products, reaction mechanism and kinetic modeling [Text] / H. Wang, B. Z. Dlugogorski, E. M. Kennedy // Prog. Energ. Combust. Sci., 2003. – Vol. 29. – P. 487–513.
14. Sinha, A. Spontaneous Coal Seam Fires: A Global Phenomenon [Text] / A. Sinha, V. K. Singh // Spontaneous Coal Seam Fires: Mitigating a Global Disaster / Beijing : UNESCO Offie. – 2005. – P. 41–66.

Получено 03.03.2018

С. П. ВИСОЦЬКИЙ^a, Д. О. КОЗИР^b

КОНТРОЛЬ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ ПОРОДНИХ ВІДВАЛІВ

^a ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»,

^b ДООУ ВПО «Донецький національний технічний університет»

Анотація. У статті проведено аналіз розвитку дистанційних методів і способів контролю температури породних відвалів. Вперше розроблено критеріальне рівняння, яке враховує основні фактори, що впливають на дистанційне вимірювання температури вогнищ самозаймання на породних відвалах. Дослідженнями встановлено, що при дистанційному контролі вогнищ самозаймання на породних відвалах, утворених при видобутку вугілля високої стадії метаморфізму (Донецький басейн, Підмосковний басейн), коефіцієнт тепловіддачі до атмосфери вище, ніж на породних відвалах, утворених при видобутку вугілля на ранній стадії метаморфізму (Печорський басейн, Челябінський басейн). Вперше лабораторними та натурними дослідженнями встановлено, що температурний контраст пропорційний відстані у ступені – 1,8. В роботі запропонована методика оцінки стану горіння шляхом вимірювання відношення концентрацій діоксиду та окису вуглецю та ступеня перетворення O₂ на вогнищах самозаймання.

Ключові слова: породний відвал, самозапалювання, пропускання атмосфери, безпілотні літальні апарати.

SERGEY VYSOTSKY ^a, DMITRIY KOZIR ^b
CONTROL OF ECOLOGICAL CONDITION OF WASTE DUMP

^a Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, ^b State Higher Education Establishment «Donetsk National Technical University»

Abstract. The article analyzes the development of remote methods and methods of control of waste dumps. For the first time a criterial equation was developed that takes into account the main factors influencing the remote measurement of the temperature of self-burning foci on waste heaps. It has been established by studies that, at remote control, the coefficient of heat transfer to the atmosphere of self-burning foci on waste heaps formed during the extraction of coal of a high stage of metamorphism (Donetsk Basin, Moscow Region Basin) is higher than that on the waste heaps formed during the coal mining of the early stage of metamorphism (Pechora Basin, Chelyabinsk swimming pool). For the first time, laboratory and field studies have established that the temperature contrast is inversely proportional to the distance of 1.8. The paper proposes a method for evaluating the combustion stage by measuring the ratio of concentrations of dioxide and carbon monoxide and the degree of conversion of O₂ to the foci of self-combustion.

Key words: waste dump, self-ignition, atmosphere passing, unmanned aerial vehicles.

Высоцкий Сергей Павлович – доктор технических наук, профессор; заведующий кафедрой техносферной безопасности ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: экологическая безопасность породных отвалов горнопромышленных агломераций.

Козырь Дмитрий Александрович – старший преподаватель кафедры природоохранной деятельности ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет». Научные интересы: экологическая безопасность породных отвалов горнопромышленных агломераций.

Висоцький Сергій Павлович – доктор технічних наук, професор; завідувач кафедри техносферної безпеки ДОНУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: екологічна безпека породних відвалів гірничопромислових агломерацій.

Козир Дмитро Олександрович – старший викладач кафедри природоохоронної діяльності ГОУ ВПО «Донецький національний технічний університет». Наукові інтереси: екологічна безпека породних відвалів гірничопромислових агломерацій.

Vysotsky Sergey – D. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Technosphere Safety Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: ecological safety of rock dumps of mining agglomerations.

Kozir Dmitriy – senior lector, Nature Protection Activity Department, State Higher Education Establishment «Donetsk National Technical University». Scientific interests: ecological safety of rock dumps of mining agglomerations.