

## Научная статья

УДК 622.822

DOI: 10.26730/1999-4125-2023-5-92-103

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОЧАГОВ САМОВОЗГОРАНИЯ УГЛЯ  
ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИПортола Вячеслав Алексеевич<sup>1</sup>, Ярош Алексей Сергеевич<sup>1</sup>,  
Бобровникова Алена Александровна<sup>1</sup>, Портола Антон Алексеевич<sup>2</sup><sup>1</sup> Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна,

\*для корреспонденции: portola2@yandex.ru

**Информация о статье**

Поступила:

25 сентября 2023 г.

Одобрена после

рецензирования:

20 ноября 2023 г.

Принята к публикации:

22 ноября 2023 г.

Опубликована:

05 декабря 2023 г.

**Ключевые слова:**очаг самовозгорания,  
эндогенный пожар, уголь,  
температура,  
теплосодержание, тушение  
очага, хладагент, породный  
отвал, использование тепла  
очага пожара**Аннотация.**

Скопления угля и углесодержащих пород при контакте с воздухом окисляются, что может привести к возникновению процесса самовозгорания. Наблюдения показывают, что размеры тепловых аномалий, возникающих от эндогенных пожаров на породных отвалах, достигают сотен и тысяч метров, а глубина прогрева достигает более 10 м. Подача хладагента для тушения таких очагов самовозгораний приводит к переносу тепла в нижележащие слои породы и их прогреву. Расчет показал, что очаг самовозгорания размером 1 м в глубину с температурой 200°C после подачи воды дополнительно прогреется до 70°C слой породы мощностью 1,3 м, а общая глубина прогрева уже составит 2,3 м. После прекращения подачи хладагента и восстановления притока воздуха возможен рецидив пожара, имеющего большие размеры. Для повышения эффективности тушения очагов самовозгорания целесообразно использовать рециркуляцию хладагента. Выдача нагретого хладагента на поверхность не только предотвратит увеличение объемов тепловой аномалии, но и позволит использовать тепло очагов пожаров в хозяйственных целях. Предложенные схемы предусматривают бурение в очаги самовозгорания труб, по которым начинает циркулировать хладагент. В очаге хладагент испаряется и пар поднимается в теплообменник, где отдает тепло, конденсируется и вновь стекает по внутренней поверхности трубы к очагу. Рассмотрена и прямоточная схема, требующая насоса для подачи жидкого хладагента в очаг.

**Для цитирования:** Портола В.А., Ярош А.С., Бобровникова А.А., Портола А.А. Использование очагов самовозгорания угля для получения тепловой энергии // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2023. № 5 (159). С. 92-103. DOI: 10.26730/1999-4125-2023-5-92-103, EDN: AHGERU

**Введение**

Контакт угля и углесодержащих пород с воздухом сопровождается окислением горючих компонентов кислородом с выделением тепла и газообразных продуктов химических реакций. Для поступления воздуха и увеличения площади контакта кислорода с горючими компонентами уголь должен быть раздроблен. При положительном тепловом балансе, когда тепла при окислении угля выделяется больше, чем теряется в окружающее пространство, происходит повышение температуры скопления. Основная опасность процесса самовозгорания

для людей заключается в выделении токсичных газов, образующихся при окислении углерода и серы [1]. Среди продуктов окисления угля наибольшую угрозу для здоровья людей представляют оксид углерода, сернистый ангидрид, сероводород.

Учитывая опасность эндогенных пожаров, возникающих от самовозгорания угля на горных предприятиях, проводятся исследования процесса сорбции кислорода скоплениями угля [2-4]. Так, в [2] введено понятие константы скорости сорбции кислорода углем, представляющее объем кислорода, поглощенный массой угля за определенное время при концентрации кислорода, равной 100%. Изучается влияние внешних факторов и свойств горючего материала на скорость повышения температуры при окислении угля [5-7]. Разрабатываются способы обнаружения и локализации очагов подземных эндогенных пожаров по выделению таких газов, как оксид углерода, водород, предельные и непредельные углеводороды [1, 8], а также радон [9]. Для предотвращения процесса самовозгорания угля предлагаются различные антипирогены, позволяющие снизить сорбционную активность горючих компонентов по отношению к кислороду [10-12].

Для тушения подземных эндогенных пожаров предусматривается подача в очаг различных хладагентов. Так, в шахтах широко использовалось нагнетание глинистой пульпы в выработанное пространство [1]. Однако применение глинистой пульпы значительно снизилось в последние годы из-за опасности прорыва скопившейся пульпы в действующие горные выработки и сложности попадания хладагента непосредственно в очаг. Использование инертных газов для борьбы с подземными пожарами [13] позволяет прекратить выделение тепла в скоплении угля и предотвратить возможность взрыва горючих газов и угольной пыли. Наибольшее распространение получила подача в участок с очагом пожара азота и углекислого газа. Недостатком инертных газов является небольшая плотность, что осложняет использование таких газов для охлаждения разогретых скоплений угля и породы. Подаваемая пена [14] способна производить объемную обработку выработанного пространства, что увеличивает вероятность попадания хладагента в очаг. Пена эффективней, чем инертный газ, охлаждает очаг, но ее низкая плотность по сравнению с водой резко снижает хладагентное действие на разогретый уголь.

Общим недостатком использования инертных газов, пены и жидких составов на основе воды для тушения очагов эндогенных пожаров является сохранение тепла в обрабатываемых скоплениях угля и породы. Подаваемый хладагент поглощает тепло в очаге и перемещается под действием силы тяжести в менее разогретые зоны, где начинает отдавать отнятое от очага тепло. Поэтому по мере подачи хладагента объем разогретого угля увеличивается из-за перераспределения тепла. После прекращения подачи хладагента и восстановления притока воздуха в скопление процесс окисления угля возобновляется. Выделяющееся тепло способствует рецидиву эндогенного пожара. Причем размер очага самовозгорания может существенно увеличиться по сравнению с первоначальным значением.

Повысить эффективность охлаждения очагов самовозгорания на угольных предприятиях позволяет рециркуляция хладагента. Выдача на поверхность хладагента, разогретого в очаге самовозгорания, способна не только предотвратить нагрев дополнительных объемов угольного скопления, но и использовать аккумулированное тепло в хозяйственных целях.

#### **Оценка теплосодержания очагов самовозгорания угля**

Начальная стадия развития процесса самовозгорания угля имеет незначительную скорость из-за небольшого значения константы скорости сорбции кислорода [2]. Для повышения температуры скопления до 80-130°C обычно требуется 2-3 месяца. Однако в породных отвалах содержание горючих компонентов может быть существенно ниже, чем в угле, поэтому и длительность повышения температуры очагов самовозгорания до критической температуры может быть значительно больше. По мере нагрева угля скорость сорбции кислорода возрастает по экспоненциальной зависимости, что способствует интенсификации роста температуры.

Несвоевременное обнаружение очагов самовозгорания на породных отвалах и скоплениях угля позволяет формироваться тепловой аномалии больших размеров. Выделяемое при окислении угля тепла распространяется за счет теплопередачи в отвале, что приводит к повышению температуры новых объемов углесодержащих пород и увеличению скорости реакций окисления горючих компонентов кислородом воздуха. На начальной стадии развития процесса самовозгорания для повышения температуры достаточно поступления кислорода в

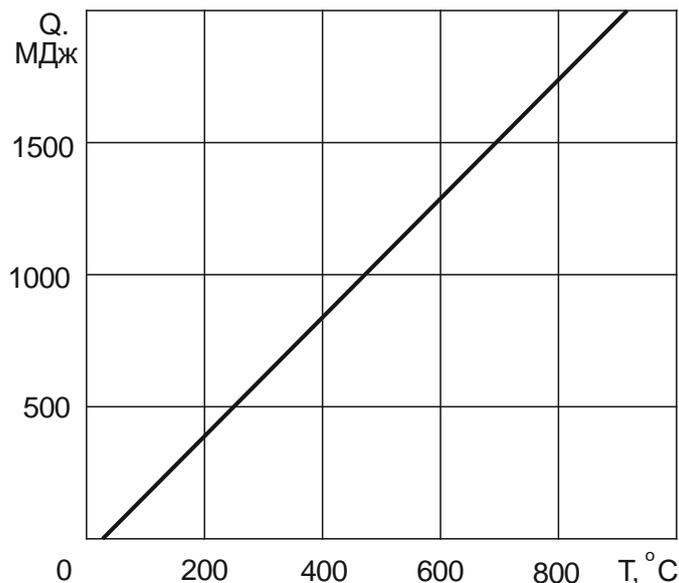


Рис. 1. Теплосодержание  $1 \text{ м}^3$  скопления углесодержащих пород в зависимости от температуры

Fig. 1. Heat content of  $1 \text{ m}^3$  of coal-bearing rock accumulation depending on temperature

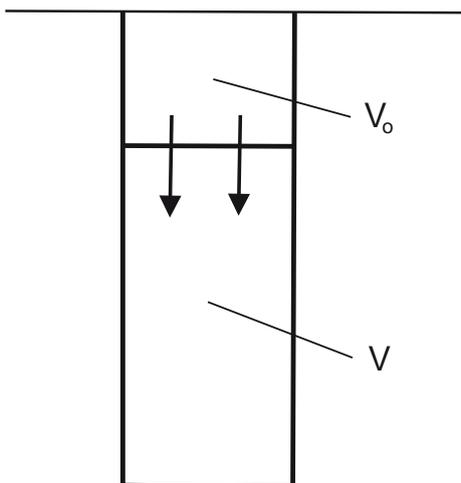


Рис. 2. Движение жидкости через породы с очагом самовозгорания:  $V_0$  – разогретый объем;  $V$  – нагреваемый жидкостью объем пород

Fig. 2. Movement of liquid through rocks with a source of spontaneous combustion:

$V_0$  – heated volume;  $V$  – volume of rocks heated by liquid

скопление пород за счет молекулярной диффузии. Дополнительному проникновению кислорода вглубь раздробленной горной массы способствует ветровой напор, создающий перепады давления воздуха на склонах породного отвала и штабелях угля. По мере повышения температуры угля и углесодержащих пород все большую роль в поступлении кислорода в очаг самовозгорания играют конвективные потоки воздуха, возникающие из-за перепадов температуры.

Проведенные исследования на породных отвалах [15] показали, что температурные аномалии, возникшие в процессе самовозгорания углесодержащих пород, могут распространяться на сотни и даже тысячи метров. Так, одна из выявленных температурных аномалий достигала в длину 1080 м, а в ширину 180 м. Площадь прогретой поверхности этого пожара составила  $194400 \text{ м}^2$ . Температура поверхности горящего отвала достигала  $500\text{--}600 \text{ °C}$ . На данном участке породного отвала было выявлено еще шесть крупных тепловых аномалий,

имеющих в длину более сотни метров каждая. Общая площадь поверхности этих температурных аномалий равнялась 323300 м<sup>2</sup>.

Для оценки объемов прогретой зоны и ее теплосодержания необходимо знать глубину прогрева горных пород. В работе [16] приведены результаты исследования распределения температуры по глубине породного отвала в зоне очага самовозгорания. Замеры температуры проводились в скважинах, пробуренных на глубину 2,5 м. Исследования показали, что температура с увеличением глубины возрастает во всех скважинах. Максимальная температура пород отвала превышала 770 °С на глубине 2,5 м. Проведенные исследования показали, что размер тепловой аномалии на горящем породном отвале зависит от времени существования пожара и при экспериментальном бурении скважин превышает в глубину 8 м, причем температура пород только увеличивалась до этой глубины. Поэтому можно предположить, что прогретая зона может составлять 10-20 м в глубину породного отвала. Выделению тепла способствовала естественная вентиляция, обеспечивающая приток кислорода к горючим элементам горных пород. Перепад давления воздуха, формирующий поступление кислорода вглубь отвала, происходил в основном за счет тепловой депрессии и ветрового напора.

Теплосодержание разогретого скопления углесодержащих пород можно определить по формуле:

$$Q = V\rho c(t_p - t_o), \quad (1)$$

где  $V$  – объем скопления углесодержащих пород, м<sup>3</sup>;  $\rho$  – плотность скопления углесодержащих пород, кг/м<sup>3</sup>;  $c$  – удельная теплоемкость скопления пород, кДж/(кг К);  $t_p$  – температура разогретого скопления, К;  $t_o$  – температура окружающей среды, К.

При расчете теплосодержания разогретой массы учтем, что плотность скопления углесодержащих пород равна 1500 кг/м<sup>3</sup>, а его удельная теплоемкость 1,5 кДж/(кг·К). Изменение теплосодержания заданного объема разогретого угольного скопления в зависимости от температуры, достигнутой в процессе самовозгорания, рассчитанное по формуле (1), приведено на Рис. 1.

Приведенные на Рис. 1 данные показывают, что в очагах эндогенных пожаров, возникающих в штабелях угля и породных отвалах, может быть запасена большая энергия. Подача воды для тушения очага самовозгорания в объеме породного отвала  $V_o$  (Рис. 2) приводит к нагреву хладагента и перемещению его под действием силы тяжести в нижележащие области скопления углесодержащих пород  $V$  с естественной температурой окружающей среды, где происходит передача тепла очага и нагрев этих пород.

Для расчета нагреваемого объема пород составим уравнение теплового баланса из условия, что конечная температура изначально прогретого объема пород, подаваемой воды и вновь прогретого объема пород  $V$  равняется 70°С, что позволяет перемещать уголь и горные породы при разборке штабелей и отвалов [17]. В этом случае количество тепла, поглощенное водой в разогретом объеме  $V_o$ , равно:

$$Q_1 = V_o\rho c(t_p - 70^\circ C). \quad (2)$$

Тепло, переданное нагретой водой объему  $V$ , можно определить из выражения:

$$Q_2 = V\rho c(70^\circ C - t_o). \quad (3)$$

Вода разместится в порах угля или углеспородного скопления, имеющего объем  $V$ . Количество тепла, поглощенного водой, можно рассчитать по выражению:

$$Q_3 = Vm\rho_B c_B(70^\circ C - t_o), \quad (4)$$

где:  $m$  – пористость скопления угля или пород;  $\rho_B$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $c_B$  – удельная теплоемкость воды, кДж/(кг К).

Учитывая, что  $Q_1 = Q_2 + Q_3$ , определить объем пород  $V$ , прогретый водой, можно с помощью уравнения:

$$V = \frac{V_o\rho c(t_p - 70^\circ C)}{(\rho c + m\rho_B c_B)(70^\circ C - t_o)}, \quad (5)$$

Результаты расчета представлены на Рис. 3. Объем прогретого скопления равнялся 1 м<sup>3</sup>, а пористость породного объема  $V$  принималась равной 0,5.

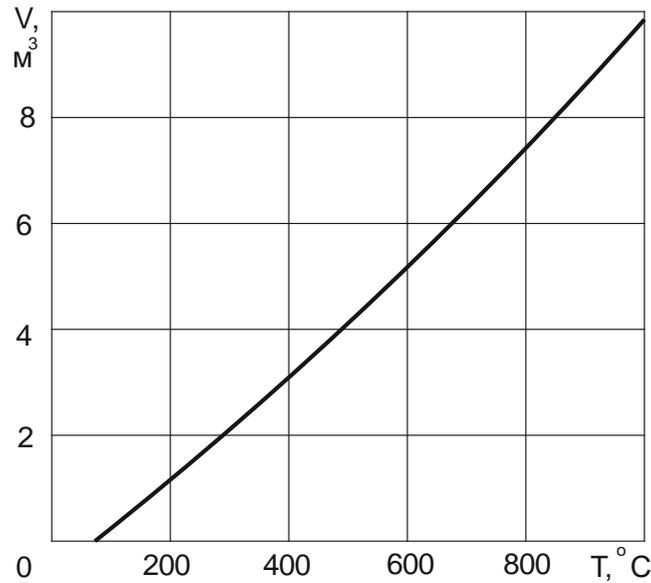


Рис. 3. Объем прогреваемого водой объема пород  $V$  в зависимости от температуры объема  $V_0$ , разогретого в процессе самовозгорания  
 Fig. 3. Volume of rock volume  $V$  heated by water depending on temperature volume  $V_0$  heated during spontaneous combustion

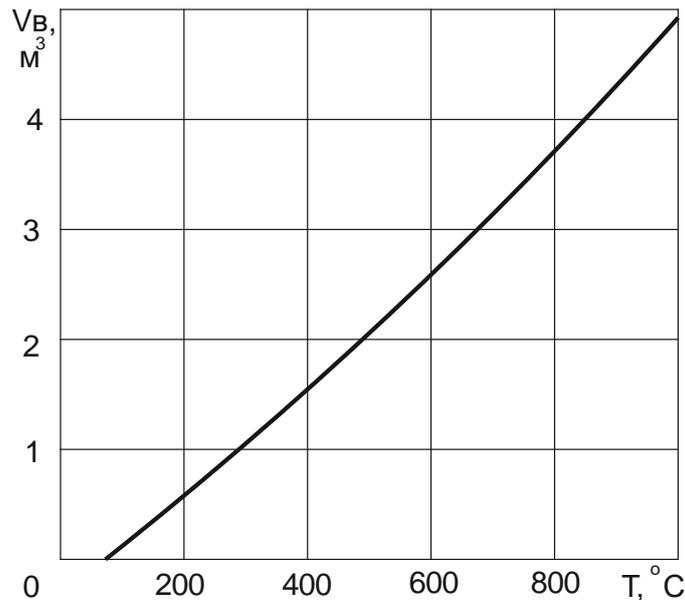


Рис. 4. Количество воды, необходимое для охлаждения до  $70^\circ\text{C}$   $1 \text{ m}^3$  прогретой углесодержащей породы в зависимости от ее начальной температуры  
 Fig. 4. Amount of water required for cooling to  $70^\circ\text{C}$   $1 \text{ m}^3$  heated carbonaceous rock depending on its initial temperature

Анализ полученных данных показывает, что при подаче воды для охлаждения до  $70^\circ\text{C}$  разогретой процессом самовозгорания углесодержащей массы происходит повышение температуры большого количества ранее не прогретой породы. Так, если очаг самовозгорания размером 1 м в глубину имел температуру  $200^\circ\text{C}$ , то после подачи воды дополнительно прогреется до  $70^\circ\text{C}$  слой породы мощностью 1,3 м. Если температура очага составляет  $600^\circ\text{C}$ , то водой прогреется слой породы на 5,6 м. Учитывая, что изначально процессом самовозгорания может быть прогрето вглубь несколько метров углесодержащих пород, то после подачи воды глубина прогретой зоны возрастет на десятки метров. Если необходимо снизить температуру породы ниже  $70^\circ\text{C}$ , то объем разогретых водой пород существенно возрастет.

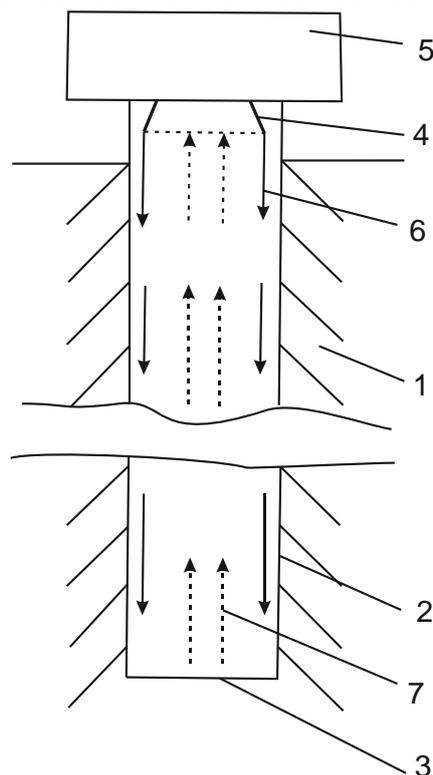


Рис. 5. Схема охлаждения пород хладагентом: 1 – нагретые породы; 2 – труба; 3 – дно трубы; 4 – устройство для подачи хладагента; 5 – теплообменная камера; 6 – жидкий хладагент; 7 – парообразный хладагент

Fig. 5. Scheme of cooling rocks with a coolant: 1 – heated rocks; 2 – pipe; 3 – bottom of the pipe; 4 – device for supplying refrigerant; 5 – heat exchange chamber; 6 – liquid refrigerant; 7 – vapor refrigerant

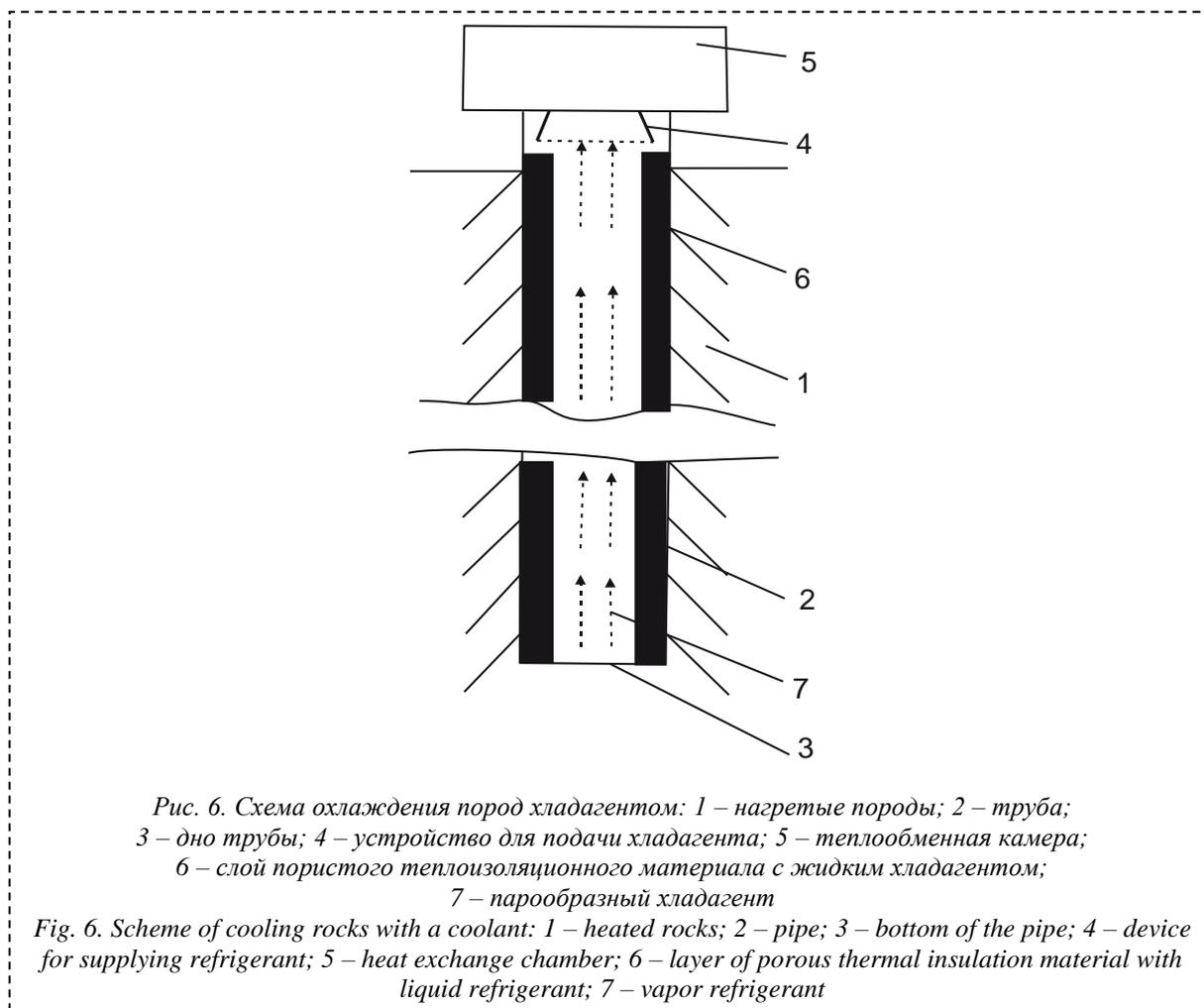
На Рис. 4 приведено количество воды, необходимой для охлаждения  $1 \text{ м}^3$  разогретого скопления породы до  $70^\circ\text{C}$  в зависимости от начальной температуры очага.

Полученные данные позволяют определить расход воды, необходимый для охлаждения очагов самовозгорания угля или углесодержащих пород в зависимости от их температуры и глубины прогрева. Анализ приведенных данных показывает, что если порода прогрета до средней температуры  $200^\circ\text{C}$  на глубину 1 м, то для охлаждения до  $70^\circ\text{C}$  на  $1 \text{ м}^2$  поверхности необходимо подать  $0,65 \text{ м}^3$  или 650 л воды. При прогреве на глубину 3 м потребуется уже 1950 л воды на каждый  $\text{м}^2$  поверхности. Однако после этого прогретым до  $70^\circ\text{C}$  окажется слой породы глубиной до 10,9 м. При такой температуре углепородная масса обладает высокой сорбционной активностью по отношению к кислороду. В случае сохранения притока воздуха в скопление может происходить быстрое повышение температуры породы, и возможен рецидив пожара.

#### Схемы съема тепла от очагов самовозгорания угля

Повысить эффективность тушения очагов самовозгорания угля позволяет рециркуляция хладагента, используемого для охлаждения прогретого угля и углесодержащих пород. При такой схеме подачи хладагента не только предотвращается дополнительный прогрев горной массы, но и появляется возможность использовать тепло эндогенных пожаров для получения энергии, например, осуществлять нагрев воды для отопления зданий, хозяйственных нужд.

Наиболее простая схема охлаждения очагов самовозгорания не потребляет энергии и не имеет насоса и компрессора. Движение хладагента в разогретую область происходит за счет силы тяжести, а образующийся после его испарения пар поднимается за счет разности плотностей пара и воздуха. Схема тушения эндогенных пожаров приведена на Рис. 5. Для реализации способа в прогретые горные породы 1 с поверхности бурят скважину, которую обсаживают трубой 2. Для предотвращения потери хладагента труба имеет дно 3. Жидкий хладагент подают на внутренние стенки трубы с помощью устройства 4. По мере стекания по поверхности трубы хладагент 6 нагревается теплом, поступающим от разогретых пород. При



температуре кипения хладагент испаряется, и пар 7 поднимается в верхнюю часть трубы в теплообменную камеру 5. В теплообменнике пар передает тепло циркулирующей жидкости и конденсируется. Образующийся конденсат устройством 4 вновь подается на поверхность трубы для повторного охлаждения пород.

Представленная схема позволяет интенсивно охлаждать верхнюю часть трубы и окружающих пород подаваемым хладагентом. Поэтому возникает опасность конденсации поднимающегося пара на охлажденной поверхности верхней части трубы. В этом случае парообразный хладагент может не дойти до теплообменника. Для повышения эффективности охлаждения разогретых пород предложен способ, предусматривающий нанесение на внутреннюю поверхность трубы пористого теплоизоляционного материала с каналами. Схема (Рис. 6) позволяет предотвратить конденсацию хладагента в зонах с уже остывшими горными породами. Благодаря нанесению пористого теплоизоляционного материала на внутренней поверхности этого слоя будет поддерживаться температура, не позволяющая конденсироваться парообразному хладагенту в трубе, а отдавать тепло в теплообменнике.

Для охлаждения очагов самовозгорания больших объемов можно использовать и прямоточную схему подачи хладагента с возвратом в теплообменник (Рис. 7). Расположение теплообменных труб может быть горизонтальным или наклонным. Для интенсификации охлаждения очага подачу хладагента целесообразно ускорить, используя насос. После прохождения через прогретые породы получаем горячий хладагент в виде жидкости или пара, который отдает тепло в теплообменной камере.

Для оценки количества тепла, передаваемого хладагенту, движущемуся в трубе через очаг эндогенного пожара, можно использовать уравнение теплопроводности, записанное в цилиндрической системе координат. В случае стационарного процесса и изменения температуры стенки трубы только в радиальном направлении уравнение имеет вид:

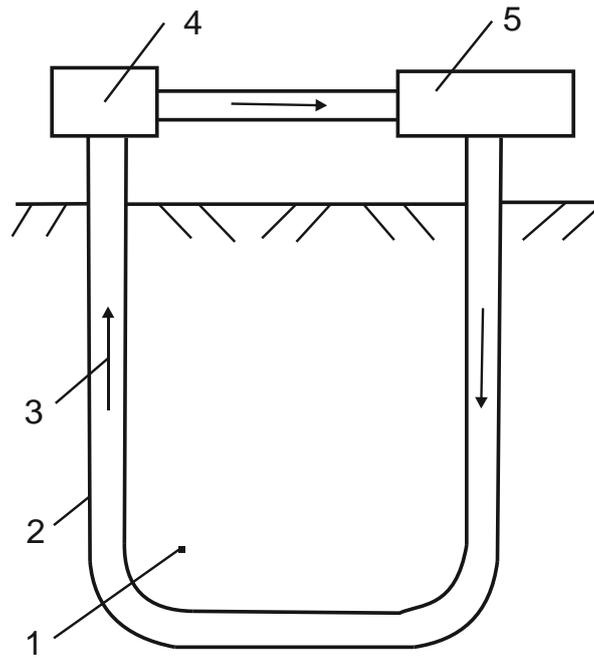


Рис. 7. Схема охлаждения пород хладагентом: 1 – нагретые породы; 2 – труба; 3 – хладагент; 4 – теплообменная камера; 5 – насос  
 Fig. 7. Scheme of cooling rocks with a coolant: 1 – heated rocks; 2 – pipe; 3 – refrigerant; 4 – heat exchange chamber; 5 – pump

$$\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} = 0, \quad (6)$$

где  $t$  – температура стенки трубы;  $r$  – радиус трубы.

Решение уравнения (6) с учетом граничных условий имеет вид [18]:

$$t = t_1 - (t_1 - t_2) \frac{\ln \frac{r}{r_1}}{\ln \frac{r_2}{r_1}}, \quad (7)$$

где  $t_1$  – температура внутренней поверхности трубы;  $t_2$  – температура наружной поверхности трубы;  $r_1$  – внутренний радиус трубы;  $r_2$  – наружный радиус трубы.

Количество тепла, проходящее через цилиндрическую поверхность соответствующей длины, можно определить по уравнению [18]:

$$Q = \frac{2\pi\gamma l(t_1 - t_2)}{\ln \frac{d_1}{d_2}}, \quad (8)$$

где  $\gamma$  – коэффициент теплопроводности стенки трубы, Вт/(м град);  $l$  – длина трубы, м;  $d_1$  – внутренний диаметр трубы, м;  $d_2$  – наружный диаметр трубы.

Из уравнения (8) видно, что увеличить поглощаемое в очаге пожара тепло можно повышением разности температур между наружной и внутренней стенкой трубы. Температура наружной стенки трубы определяется температурой очага, и мы не можем ее произвольно менять. Для увеличения теплосъема целесообразно уменьшить температуру внутренней стенки трубы. Добиться этого эффекта можно за счет снижения температуры кипения хладагента, применяемого выноса тепла.

Наблюдения за очагами самовозгорания угля показывают, что использовать можно значительно больше тепла, чем при начальной оценке теплосодержания прогретых пород. Так, окисление угля с выделением тепла происходит постоянно при сохранении притока воздуха. Поэтому использование тепла подземных очагов эндогенных пожаров может происходить до полного выгорания горючих компонентов.

#### Заключение

Проведенные исследования показали, что эндогенные пожары могут образовывать на поверхности породных отвалов температурные аномалии размеров в сотни и тысячи метров, обладающие огромным запасом энергии. Так, 1 м<sup>3</sup> углесодержащей породы с температурой 400°C содержит 855000 МДж. Глубина прогретой зоны может достигать десяти и более метров.

Тушение таких очагов самовозгорания в скоплениях угля или в породных отвалах подачи хладагента приводит к поступлению разогретой жидкости в нижележащие слои и их разогреву. Одновременно с падением температуры очага происходит увеличение объема разогретой массы углесодержащих пород, что может вызвать рецидив пожара после восстановления притока воздуха.

Повысить эффективность тушения очагов самовозгорания позволяет рециркуляция хладагента. Разогретая в очаге пожара жидкость или образующийся из нее пар возвращаются в теплообменную камеру, где отдают отнятое от очага тепло для использования его в хозяйственных нуждах или обогрева помещений. Теплосъем с очага подземного пожара может происходить до полного выгорания горючих компонентов.

#### **Благодарности**

*Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда и Кемеровской области-Кузбасса № 22-27-20004, <https://rscf.ru/project/22-27-20004/>*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сочинский А. А., Огиевский В. М. Рудничные пожары. М. : Издательство «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2011. 375 с.
2. Веселовский В. С., Алексеева Н. Д., Виноградова Л. Н., Орлеанская Г. Л., Терпюгосова Е. А. Самовозгорания промышленных материалов. М. : Наука, 1964. 246 с.
3. Xiao Y., Ren S., Deng J., Shu C.. Comparative analysis of thermokinetic behavior and gaseous products between first and second coal spontaneous combustion. *Fuel*. 2017; 227:325–333.
4. Moshood O., Bekir G., Abisola R., Andrew M., Thapelo N. Influence of antioxidants on spontaneous combustion and coal properties. *Process Safety Environ Protect*. 2021; 148:1019–1032.
5. Kaymakçi E., Didari V. Relations between coal properties and spontaneous combustion parameters. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*. 2002. Vol. 26, Iss. 1, Pp. 59–64.
6. Moghtaderi B., Dlugogorski B. Z., Kennedy E. M. Effects of wind flow on self-heating characteristics of coal stockpiles. *Process Safety and Environmental Protection*. 2000. Vol. 78, Iss. 6. Pp. 445–453.
7. Казанин О. И., Сидоренко А. А., Тюрнин В. А. Оценка влияния горнотехнических факторов на эндогенную пожароопасность при отработке сближенных угольных пластов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2013. № 4. С. 22–27.
8. Liang Y., Zhang J., Wang L., Luo H., Ren T. Forecasting spontaneous combustion of coal in underground coal mines by index gases: A review // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2009; 57:208–222.
9. Портола В. А., Тайлаков О. В., Ли Хи Ун, Соболев В. В., Бобровникова А. А. Обнаружение, локация и оценка состояния очагов подземных пожаров по аномалиям радона на земной поверхности // *Уголь*. 2021. № 5. С. 47–52. DOI: 10.18796/0041-5790-2021-5-47-52.
10. Wang D., Dou G., Zhong X., Xin H., Qin B.. An experimental approach to selecting chemical inhibitors to retard the spontaneous combustion of coal // *Fuel*. 2014; 117:218–223.
11. Портола В. А., Черских О. И., Протасов С. И., Серегин Е. А., Шваков И. А. Исследование воздействия антипирогенов на процесс самовозгорания бурого угля // *Уголь*. 2022. № 12. С. 54–60. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-12-54-60.
12. Moshood O., Bekir G., Abisola R., Andrew M., Thapelo N. Influence of antioxidants on spontaneous combustion and coal properties. *Process Safety Environ Protect*. 2021;148: 1019–1032.
13. Коврижин О. И., Коляда А. Ю., Калиниченко Н. А. Использование газообразного азота при ликвидации подземных пожаров // *Научный вестник НИИГД Респиратор*. 2020. № 5 (57). С. 37–44.
14. Игишев В. Г. Борьба с самовозгоранием угля в шахтах. М. : Недра, 1987. 176 с.
15. Портола В. А., Скударнов Д. Е., Протасов С. И., Подображин С. Н. Оценка параметров очагов самовозгорания породных отвалов угольных карьеров и способов их тушения // *Безопасность труда в промышленности*. 2017. № 11. С. 42–47.
16. Протасов С. И., Серегин Е. А., Портола В. А., Бобровникова А. А. Исследование очагов эндогенных пожаров на породных отвалах угольных предприятий // *Безопасность труда в промышленности*. 2021. № 8. С. 65–70. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-8-65-70
17. Инструкция по предупреждению экзогенной и эндогенной пожароопасности на объектах ведения горных работ угольной промышленности: федер. нормы и правила в обл. пром. безопасности. Сер. 05. Вып. 61. М. : ЗАО НТЦ ПБ, 2021. 60 с.
18. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. М.-Л. : Энергия, 1965. 424 с.

© 2023 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

*Об авторах:*

Портола Вячеслав Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, (Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), e-mail: portola2@yandex.ru

Ярош Алексей Сергеевич, канд. тех. наук, директор ИЦ ПГи ИБ, (Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), e-mail: 89235205720@mail.ru

Бобровникова Алена Александровна, канд. хим. наук, зав. кафедрой обогащения полезных ископаемых (Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), , Россия, e-mail: baa.htnv@kuzstu.ru

Портола Антон Алексеевич, студент СПбГУПТД, Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, (198095, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 18), e-mail: forestfox2014@gmail.com

*Заявленный вклад авторов:*

Портола Вячеслав Алексеевич – научный менеджмент, обзор соответствующей литературы, концептуализация исследования, написание текста.

Ярош Алексей Сергеевич – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, сбор и анализ данных, выводы.

Бобровникова Алена Александровна – постановка исследовательской задачи, обзор соответствующей литературы, сбор и анализ данных, выводы.

Портола Антон Алексеевич – обзор соответствующей литературы, выполнение графической части, перевод.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## Original article

### THE USAGE OF SPONTANEOUS COMBUSTION OF COAL TO PRODUCE THERMAL ENERGY

Portola Vyacheslav A<sup>1</sup>., Yarosh Sergey A<sup>1</sup>.,  
Bobrovnikova Alena A<sup>1</sup>., Portola Anton A<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>Siberian State Industrial University

<sup>2</sup>Siberian branch of JSC "VNIMI

<sup>3</sup>T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, branch in Prokopyevsk

\*for correspondence: portola2@yandex.ru



#### Article info

Received:  
25 September 2023

Accepted for publication:  
20 November 2023

Accepted:  
22 November 2023

Published:  
05 December 2023

**Keywords:** spontaneous

#### Abstract.

Accumulations of coal and carbon-containing rocks in contact with air are oxidized, which can lead to spontaneous combustion. Observations show that the sizes of heat anomalies arising from endogenous fires in rock dumps reach hundreds and thousands of meters, and the depth of warming reaches 10 m and more. The supply of refrigerant to extinguish such spontaneous combustion leads to the transfer of heat to the underlying rock layers and their warming up. The calculation showed that the place of spontaneous combustion with a size of 1 m in depth and a temperature of 200 °C after the water supply will additionally warm up the rock layer with a thickness of 1.3 m to 70 °C, and the total depth of warming will already be 2.3 m. After the refrigerant supply is stopped and the air supply is restored, the fire of a larger size can reoccur. To increase the efficiency of extinguishing spontaneous combustion, it is advisable to use refrigerant recirculation. The delivery of heated refrigerant to the surface will not only prevent an increase of heat anomalies in volume, but will also allow using heat from fires for economic purposes. The proposed schemes provide for drilling into the

combustion, endogenous fire, coal, temperature, heat content, fire extinguishing, refrigerant, rock dump, use of fire source heat.

places of spontaneous combustion and installation of pipes through which the refrigerant shall circulate. In the place of combustion, the refrigerant evaporates and the steam rises into the heat exchanger, where it gives up heat, condenses and flows again down the inner surface of the pipe to the place of combustion. A direct-flow scheme requiring a pump to supply liquid refrigerant to the place of combustion is also considered.

**For citation:** Portola V.A., Yarosh S.A., Bobrovnikova A.A., Portola A.A. The usage of spontaneous combustion of coal to produce thermal energy. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2023; 5(159):92-103. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2023-5-92-103, EDN: AHGEPU

## REFERENCES

1. Skochinsky A.A., Ogievsky V.M. Mine fires. M.: Publishing house "Mining business" LLC "Cimmerian center"; 2011. 375 p.
2. Veselovsky V.S., Alekseeva N.D., Vinogradova L.N., Orleanskaya G.L., Terpogosov E.A. Spontaneous combustion of industrial materials. M.: Nauka; 1964. 246 p.
3. Xiao Y., Ren S., Deng J., Shu C. Comparative analysis of thermokinetic behavior and gaseous products between first and second coal spontaneous combustion. *Fuel*. 2017; 227:325–333.
4. Moshood O., Bekir G., Abisola R., Andrew M., Thapelo N. Influence of antioxidants on spontaneous combustion and coal properties. *Process Safety Environ Protect*. 2021; 148:1019–1032.
5. Kaymakçi E., Didari V. Relations between coal properties and spontaneous combustion parameters. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*. 2002; 26(1):59–64.
6. Moghtaderi B., Dlugogorski B.Z., Kennedy E.M. Effects of wind flow on self-heating characteristics of coal stockpiles. *Process Safety and Environmental Protection*. 2000; 78(6):445–453.
7. Kazanin O.I., Sidorenko A.A., Tyurnin V.A. Evaluation of the influence of mining engineering factors on endogenous fire hazard during the development of adjacent coal seams. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2013; 4:22–27.
8. Liang Y., Zhang J., Wang L., Luo H., Ren T. Forecasting spontaneous combustion of coal in underground coal mines by index gases: A review. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019; 57:208–222.
9. Portola V.A., Taylakov O.V., Lee Hi Un, Sobolev V.V., Bobrovnikova A.A. Detection, location and assessment of the state of underground fires based on radon anomalies on the earth's surface. *Coal*. 2021; 5:47–52. DOI: 10.18796/0041-5790-2021-5-47-52.
10. Wang D., Dou G., Zhong X., Xin H., Qin B. An experimental approach to selecting chemical inhibitors to retard the spontaneous combustion of coal. *Fuel*. 2014; 117:218–223.
11. Portola V.A., Cherskikh O.I., Protasov S.I., Seregin E.A., Shvakov I.A. Study of the impact of antipyrogens on the process of spontaneous combustion of brown coal. *Coal*. 2022; 12:54–60. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-12-54-60.
12. Moshood O., Bekir G., Abisola R., Andrew M., Thapelo N. Influence of antioxidants on spontaneous combustion and coal properties. *Process Safety Environ Protect*. 2021;148: 1019–1032.
13. Kovrizhin O.I., Kolyada A.Yu., Kalinichenko N.A. The use of gaseous nitrogen in the elimination of underground fires. *Scientific Bulletin of NIIGD Respirator*. 2020; 5(57):37–44.
14. Igishev V.G. Fight against spontaneous combustion of coal in mines. M.: Nedra; 1987. 176 p.
15. Portola V.A., Skudarnov D.E., Protasov S.I., Podobrazhin S.N. Evaluation of the parameters of spontaneous combustion sources of rock dumps of coal pits and methods for their extinguishing. *Labor safety in industry*. 2017; 11:42–47.
16. Protasov S.I., Seregin E.A., Portola V.A., Bobrovnikova A.A. Investigation of endogenous fires on rock dumps of coal enterprises. *Safety of labor in industry*. 2021; 8:65–70. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-8-65-70
17. Instructions for the prevention of exogenous and endogenous fire hazard at the objects of mining operations in the coal industry: Feder. rules and regulations in the region prom. security. Ser. 05. Issue. 61. M.: ZAO NTC PB; 2021. 60 p.
18. Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. Heat transfer. M.-L.: Energy; 1965. 424 p.

© 2023 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Portola Vyacheslav Alekseevich, Doctor of Engineering. Sciences, Professor, Kuzbass State Technical

---

University named after T.F. Gorbachev (650000, Russia, Kemerovo, Vesennaya st., 28). e-mail: portola2@yandex.ru

Yarosh Alexey Sergeevich, Ph.D. those. Sciences, Director of the IC PGiB, , Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev (650000, Russia, Kemerovo, Vesennaya st., 28).

Bobrovnikova Alena Aleksandrovna, Ph.D. chem. Sciences, Associate Professor, Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev (650000, Russia, Kemerovo, Vesennaya st., 28).

Portola Anton Alekseevich, student of the St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design (198095, Russia, St. Petersburg, Bolshaya Morskaya St., 18).

*Contribution of the authors:*

Portola Vyacheslav Alekseevich – scientific management, review of relevant literature, conceptualization of the study, writing the text.

Yarosh Alexey Sergeevich – formulation of the research problem, scientific management, data collection and analysis, conclusions.

Bobrovnikova Alena Aleksandrovna – formulation of the research problem, review of relevant literature, collection and analysis of data, conclusions.

Portola Anton Alekseevich – review of relevant literature, implementation of the graphic part, translation.

*All authors have read and approved the final manuscript.*

