

УДК 622.822.2 © В.А. Портола<sup>1,2</sup>, В.И. Храмцов<sup>2</sup>,  
Е.А. Киренберг<sup>1,2</sup>, 2025

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный  
технический университет им. Т.Ф. Горбачева»,  
650000, г. Кемерово, Россия  
<sup>2</sup> ООО НПО «АЛЗАМИР», 650036, г. Кемерово, Россия  
✉ e-mail: portola2@yandex.ru



UDC 622.822.2 © V.A. Portola<sup>1,2</sup>, V.I. Khramtsov<sup>2</sup>,  
E.A. Kirenberg<sup>1,2</sup>, 2025

<sup>1</sup> T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University,  
Kemerovo, 650000, Russian Federation  
<sup>2</sup> LLC Scientific and Production Association "ALZAMIR",  
Kemerovo, 650036, Russian Federation  
✉ e-mail: portola2@yandex.ru

# Оценка эффективности применения способа увлажнения для предупреждения самовозгорания угля

## Assessment of the application efficiency of a wetting method to prevent spontaneous coal combustion

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2025-4-89-94>

Профилактика самовозгорания угля позволяет повысить безопасность работ на угольных предприятиях и снизить экономический ущерб от эндогенных пожаров. Проведены исследования влияния увлажнения угля на его сорбционную активность, инкубационный период самовозгорания, коэффициент проницаемости скопления, а также выделение метана, оксида углерода и углекислого газа. Установлено, что увлажнение снижает сорбционную активность угля по отношению к кислороду в течение 15 сут., затем увлажненный уголь становится активной необработанных проб. Для поддержания профилактического эффекта необходима периодическая подача воды в скопления угля. Увлажнение угля резко снижает образование оксида углерода по сравнению с необработанными пробами и не влияет на выделение углекислого газа. Поступление метана из увлажненного угля также меньше, чем из необработанных проб. Однако по мере испарения влаги из угля выделение оксида углерода и метана становится больше, чем у необработанных проб.

**Ключевые слова:** самовозгорание, уголь, профилактика самовозгорания, увлажнение, инкубационный период самовозгорания, константа скорости сорбции кислорода, выделение газов.

**Для цитирования:** Портола В.А., Храмцов В.И., Киренберг Е.А. Оценка эффективности применения способа увлажнения для предупреждения самовозгорания угля // Уголь. 2025;(4):89-94. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-4-89-94.

### Abstract

Prevention of spontaneous combustion of coal helps to increase the operational safety at coal enterprises and reduce the economic damage caused by spontaneous fires. The article investigates the effects of coal wetting on its sorption activity, the incubation period of spontaneous combustion, the permeability coefficient of coal accumulation, as well as the release of methane, carbon monoxide and

### ПОРТОЛА В.А.

Доктор техн. наук, профессор,  
профессор кафедры Аэрологии,  
охраны труда и природы  
ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный  
технический университет  
им. Т.Ф. Горбачева»,  
650000, г. Кемерово, Россия,  
заместитель начальника отдела  
ООО НПО «АЛЗАМИР»,  
650036, г. Кемерово, Россия,  
e-mail: portola2@yandex.ru

### ХРАМЦОВ В.И.

Канд. техн. наук, начальник отдела  
ООО НПО «АЛЗАМИР»,  
650036, г. Кемерово, Россия,  
e-mail: khramtsov49@yandex.ru

### КИРЕНБЕРГ Е.А.

Магистрант ФГБОУ ВО «Кузбасский  
государственный технический  
университет им. Т.Ф. Горбачева»,  
650000, г. Кемерово, Россия,  
инженер ООО НПО «АЛЗАМИР»,  
650036, г. Кемерово, Россия,  
e-mail: Omega440@yandex.ru

*carbon dioxide. Wetting was found to reduce the sorption activity of coal with respect to oxygen for 15 days, then the wetted coal becomes more active than the non-treated samples. Periodic wetting of coal accumulations is required to maintain the preventative effect. Coal wetting sharply reduces carbon monoxide formation as compared to non-treated samples and does not affect carbon dioxide emission. Methane release from wetted coal is also lower than from the non-treated samples. However, as the moisture evaporates from the coal, the carbon monoxide and methane release becomes greater than those from the non-treated samples.*

#### Keywords

*Spontaneous combustion, coal, prevention of spontaneous combustion, moistening, Incubation period of spontaneous combustion, oxygen sorption rate constant, gas release.*

#### For citation

Portola V.A., Khramtsov V.I., Kirenberg E.A. Assessment of the application efficiency of a wetting method to prevent spontaneous coal combustion. *Ugol'*. 2025;(4):89-94. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2025-4-89-94.

## ВВЕДЕНИЕ

Способность угля к окислению кислородом воздуха в процессе добычи и хранения приводит к опасности возникновения очагов самовозгорания. Зачастую эндогенные пожары появляются и в углесодержащих породах отвалов. Склонность к самовозгоранию таких пород зависит не только от концентрации угля, но и от содержания серы. Повышение температуры угля и углесодержащих пород за счет окисления приводит к выделению токсичных и горючих газов [1]. Поэтому возникновение очагов самовозгорания угля на угледобывающих предприятиях приводит не только к опасности отравления людей, но и к формированию взрывоопасной газовой смеси. Для сотрудников предприятий наибольшую опасность представляют оксид углерода, образующийся в процессе окисления угля, а также соединения серы с кислородом и водородом.

Пожары, вызванные самовозгоранием угля и углесодержащих пород, могут повредить дорогостоящее горнодобывающее оборудование и горные выработки, привести к утрате значительных запасов угля, что снижает эффективность использования ресурсной базы и может потребовать дополнительных затрат на разведку и разработку новых месторождений. Эндогенные пожары в угольных шахтах, на разрезах, породных отвалах и складах угля могут иметь серьезные экологические последствия [2]. Так, горящий уголь выделяет большое количество углекислого газа и других вредных веществ в атмосферу, что способствует загрязнению воздуха и изменению климата. Выделяемый при нагревании угля метан является мощным парниковым газом, превышающим в 25 раз воздействие углекислого газа на глобальное потепление.

Снизить риск возникновения эндогенных пожаров на горных предприятиях позволяют профилактические мероприятия, уменьшающие генерацию тепла при окислительных реакциях или увеличивающие потери этого тепла из скоплений угля. Сложность предупреждения эндогенных пожаров обусловлена зависимостью процесса

самовозгорания от множества факторов [3, 4]. Для профилактики самовозгорания используют подачу инертных газов в скопления угля и окружающую его атмосферу [5, 6]. Однако инертные газы не эффективны для предупреждения процесса самовозгорания на разрезах из-за потерь в атмосферу.

Средством профилактики самовозгорания является обработка угля антипирогеном, снижающим поглощение кислорода [7, 8]. Сложность этого метода заключается в том, что действие антипирогенов может меняться в зависимости от свойств угля [7]. На открытых горных работах и отвалах эффективность действия антипирогенов может снижаться под действием окружающей среды. Существует метод применения пены для предотвращения самовозгорания угольных пластов [9, 10]. Недостатком пены является ее быстрый распад. Этот недостаток устраняют, вспенивая цемент [11], однако в этом случае существенно возрастает стоимость работ. Проводятся исследования способа профилактики самовозгорания подачей геля [12, 13], но затруднения возникают из-за сложности технологии получения геля и изменения его свойств с течением времени. В шахтах используют подачу золы в выработанное пространство [14], что снижает поступление воздуха к углю. На породных отвалах самовозгорание часто предотвращают подачей воды [15, 16].

Опыт борьбы с эндогенными пожарами в шахтах и на угольных разрезах показывает, что одним из распространенных способов профилактики самовозгорания является увлажнение скоплений угля и углесодержащих пород. Угольные скопления также подвергаются воздействию воды при атмосферных осадках на земной поверхности, притоках воды в подземных условиях. Однако в настоящее время существуют противоречивые оценки действия увлажнения на процесс самовозгорания угля. Так, в некоторых исследованиях вода активизирует самовозгорание угля [17], в других работах замедляет этот процесс [4]. Для эффективного применения воды необходимо учесть комплексное ее влияние на уголь, в том числе на сорбционную способность по отношению к кислороду, а также на выделение опасных газов из угля.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Подача воды в скопление угля оказывает влияние на генерацию тепла за счет изменения скорости сорбции кислорода, а также его потери при испарении жидкости. Причем с течением времени такое воздействие может меняться количественно и качественно. Исследование влияния воды на уголь проводилось на установке, включающей сорбционные сосуды с пробами угля фракции 1-3 мм. Уголь марки ДГ имел влажность 5,2%. После выдержки проб угля в сорбционном сосуде в течение 24 ч определяли убыль концентрации кислорода в воздухе сорбционных сосудов, происходящую за счет поглощения углем. Константу скорости сорбции кислорода углем определяли после лабораторных исследований по формуле:

$$K_T = -\frac{V}{M\tau} \ln \frac{C_A(100 - C_1)}{C_1(100 - C_A)}, \quad (1)$$

где  $M$  – масса пробы угля в сосуде, г;  $V$  – объем воздуха в сорбционном сосуде, контактирующий с углем, мл;

$\tau$  – длительность контакта воздуха с углем, ч;  $C_1$  – начальная концентрация кислорода в воздухе сорбционного сосуда, %;  $C_A$  – концентрация кислорода в сосуде через время  $\tau$ , %.

Для оценки влияния увлажнения на сорбционную активность угля брали:

- необработанные пробы с исходной влажностью 5,18%;
- пробы с добавлением дистиллированной воды до влажности 13,79%;
- пробы с добавлением дистиллированной воды до влажности 24,12%.

После каждого измерения кислорода сорбционные сосуды продували воздухом и открывали для доступа атмосферного воздуха на несколько суток. Затем опять герметично закрывали на сутки для определения количества сорбированного углем кислорода. Для измерения влажности образцы исследуемого угля помещали в сушильный шкаф с температурой 105-110°C. Общее время наблюдения за пробами угля составило 49 сут. Одновременно с замером концентрации кислорода в сорбционных сосудах определяли содержание таких выделившихся газов, как метан, оксид углерода и углекислый газ. Изменение константы скорости сорбции кислорода пробами угля с различной влажностью во времени показано на рис. 1.

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что после увлажнения константа скорости сорбции кислорода углем существенно снижается по сравнению с необработанными пробами. С увеличением влажности этот антипирогенный эффект возрастает. Так, через сутки выдержки константа скорости сорбции кислорода необработанного угля (влажность – 5,18%) составила 0,1467 мл/(г·ч), увлажненного до 13,79% – снизилась до 0,1085 мл/(г·ч), а у проб с влажностью 24,12% – упала до 0,0800 мл/(г·ч). С течением времени сорбционная активность всех проб угля начала снижаться, но с различной скоростью. Уже через 15 сут. наблюдения константа скорости сорбции кислорода у необработанной пробы угля стала меньше, чем у увлажненных проб. К этому времени значительная доля воды, внесенная в уголь, испарилась, открыв доступ кислорода к ранее не окисленным поверхностям скопления. Однако сорбционная активность более увлажненного угля оставалась ниже, чем у менее увлажненного. Ситуация изменилась на 28-е сут., когда самым активным оказался уголь с наибольшим начальным увлажнением.

Длительность инкубационного периода самовозгорания проб угля рассчитывали по формуле, приведенной в [18, 19]:

$$\tau_{\text{инк}} = \frac{C(T_k - T_0) + 0,6(j + g)W_0 + q_d X}{24\alpha K_T^{0,45} C_0 q_0}, \quad (2)$$

где  $C$  – удельная теплоемкость скопления угля, кал/(г·К);  $T_0$  – начальная температура угольного скопления °С;  $T_k$  – критическая температура самовозгорания угля, °С;  $W_0$  – начальная влажность угольного скопления, доли ед.;  $j$  – теплота испарения воды, кал/г;  $g$  – удельная теплота плавления льда, кал/г (учитывается только для угля, находящегося при отрицательных температурах);  $q_d$  – удель-

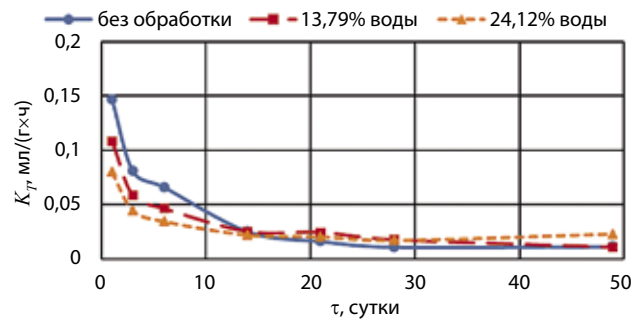


Рис. 1. Изменение константы скорости сорбции кислорода во времени пробами угля различной влажности

Fig. 1. Variation of oxygen sorption rate constant in time using coal samples with different moisture content

ная теплота десорбции метана, кал/мл;  $X$  – природная газоносность угля, мл/г;  $K_T$  – константа скорости сорбции кислорода углем, мл/(г·ч) (определяется при температуре от 0 до +10°C для угля, находящегося при отрицательных температурах, или при температуре от 15 до 25°C для угля, находящегося при положительных температурах);  $\alpha$  – коэффициент усвоения кислорода воздуха,  $C_0$  – концентрация кислорода на входе в угольное скопление, доли ед.;  $q_0$  – удельная теплота сорбции кислорода воздуха углем, кал/мл.

Расчет по формуле (2) показал, что до начала лабораторных исследований длительность инкубационного периода самовозгорания необработанного угля (влажность – 5,18%) составляла 54,4 сут., что позволяет отнести его к категории склонных к самовозгоранию [19]. Для угля с влажностью 13,79% инкубационный период увеличился до 82,5 сут., а для угля с влажностью 24,12% – возрос до 114,1 сут., что соответствует категории несклонных к самовозгоранию. За время исследования (49 сут.) влажность угля снизилась во всех пробах за счет испарения воды. Так, необработанный уголь через 49-е сут. имел влажность 1,26%, уголь, увлажненный до 13,79%, также достиг влажности 1,26%. У самой влажной пробы (24,12%) содержание воды в угле снизилось до 2,98%. Расчет показал, что по состоянию на 49 сутки эксперимента длительность инкубационного периода самовозгорания необработанного угля составила 88,4 сут., а увлажненного до 13,79% – равнялась 89,6 сут. Максимально увлажненный уголь (24,12%) через 49 сут. имел инкубационный период самовозгорания 77,6 сут., что соответствует категории склонных к самовозгоранию.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что увлажнение угля снижает его сорбционную активность в условиях эксперимента в течение 15 сут. Затем сорбционная активность увлажненного угля становится больше, чем у необработанного. Поэтому для снижения риска развития очагов самовозгорания за счет продления антипирогенного воздействия требуется повторное увлажнение угольных скоплений. Необходимо учесть, что в реальных условиях шахты или разреза внешние условия (влажность, температура и скорость движения окружающего воздуха) могут отличаться от лабораторных, поэтому и длительность антипирогенного воздействия на уголь в условиях

предприятий может быть больше или меньше полученных в эксперименте 15 сут.

Изменение концентрации оксида углерода и метана в сорбционном сосуде после контакта с пробами угля различной влажности в течение 24 ч приведено на рис. 2, 3.

Приведенные на рис. 2 результаты свидетельствуют, что после увлажнения резко снижается выделение оксида углерода из угля. Так, на шестые сутки концентрация оксида углерода в воздухе с пробами угля с влажностью 13,79% оказалась в шесть раз меньше, чем у необработанного, а у угля, увлажненного до 24,12%, – в 14,2 раза

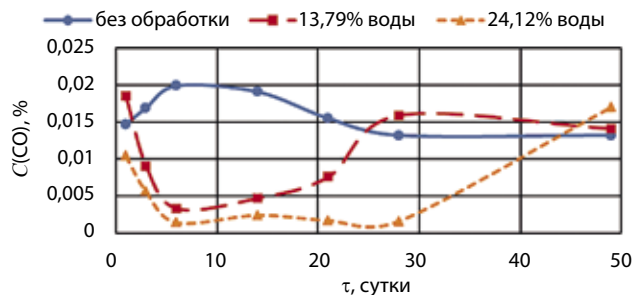


Рис. 2. Изменение концентрации оксида углерода, выделившегося из проб угля с различной влажностью

Fig. 2. Variation of carbon monoxide concentration released from coal samples with different moisture content

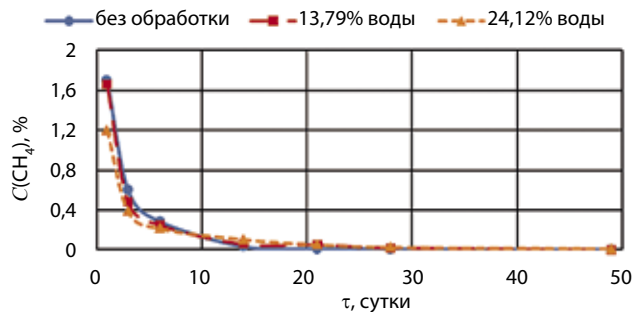


Рис. 3. Изменение концентрации метана, выделившегося из проб угля различной влажности

Fig. 3. Variation of methane concentration released from coal samples with different moisture content

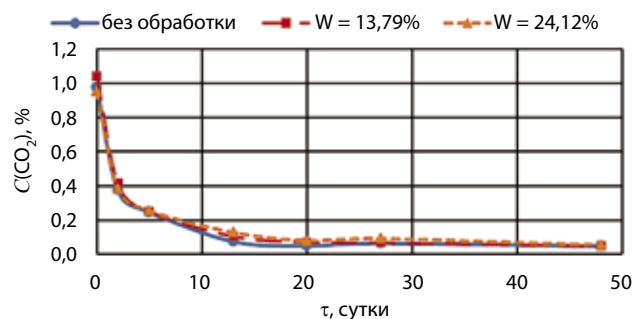


Рис. 4. Изменение концентрации углекислого газа, выделившегося из проб угля различной влажности

Fig. 4. Variation of carbon dioxide concentration released from coal samples with different moisture content

меньше. Затем у необработанного угля начинается снижение концентрации образовавшегося оксида углерода, а увлажненные пробы увеличивают выделение этого токсичного и горючего газа. Через некоторое время, зависящее от количества добавленной воды, обработанный водой уголь образует оксида углерода больше, чем необработанный. Для данной марки угля увлажненная до 13,79% проба превысила интенсивность выделения оксида углерода по сравнению с необработанным углем через 24 сут., а проба с влажностью 24,12% – только через 43 сут. Полученные особенности газовыделения оксида углерода из угля можно использовать при добыче угля в шахтах для снижения содержания этого опасного газа в воздухе рабочей зоны. Для добываемого угля можно экспериментально подобрать норму увлажнения, необходимую для снижения концентрации оксида углерода до санитарных норм в течение заданного времени.

Из анализа результатов влияния увлажнения угля на выделение метана (см. рис. 3) установлено, что после дробления угля выделение метана из всех проб быстро снижается с течением времени. Причем вначале концентрация метана меньше в увлажненных пробах. Например, на третьи сутки содержание метана в воздухе с необработанным углем составило 0,602%, с увлажненным до 13,79% – равнялось 0,480%, а в пробах с влажностью 24,12% только 0,384%. Однако через 8 сут. из ранее увлажненных проб угля метана стало выделяться больше, чем из необработанного угля. На 29-е сут. наблюдений концентрация метана в пробах неувлажненного угля равнялась 0,0052%, с влагой 13,79% – составила 0,0190%, а в угле с влажностью 24,12% – достигала 0,0219%.

На основании полученных данных можно сделать вывод о возможности краткосрочного снижения выделения метана из угля (около 8 сут.) за счет увлажнения. Так, за первые сутки уголь, увлажненный до 24,12%, выделяет в 1,41 меньше метана, чем необработанный. На третьи сутки этот уголь выделяет метана в 1,56 раза меньше. Такое снижение образования метана можно использовать в шахте в комплексе с профилактикой самовозгорания и снижением содержания оксида углерода в рудничной атмосфере. Для продления этого эффекта необходимы повторные обработки угля водой. Эффект воздействия увлажнения на выделение метана значительно меньше, чем на образование оксида углерода.

Выделение углекислого газа из угля практически не зависит от степени увлажнения проб (рис. 4). Максимальная концентрация углекислого газа была получена за первые сутки наблюдений (около 1,0% для всех проб). Затем выделение углекислого газа быстро снижалось в течение 15 сут.

Одним из условий развития процесса самовозгорания угля и углесодержащих пород является поступление воздуха в скопления для окисления горючих компонентов. На начальной стадии самовозгорания для повышения температуры угля достаточно молекулярной диффузии кислорода вглубь скопления, затем подача воздуха происходит под действием развиваемой очагом тепловой депрессии, а также ветрового напора на земной поверхности или перепада давления воздуха в шахте. Поэтому для профилактики самовозгорания может использоваться

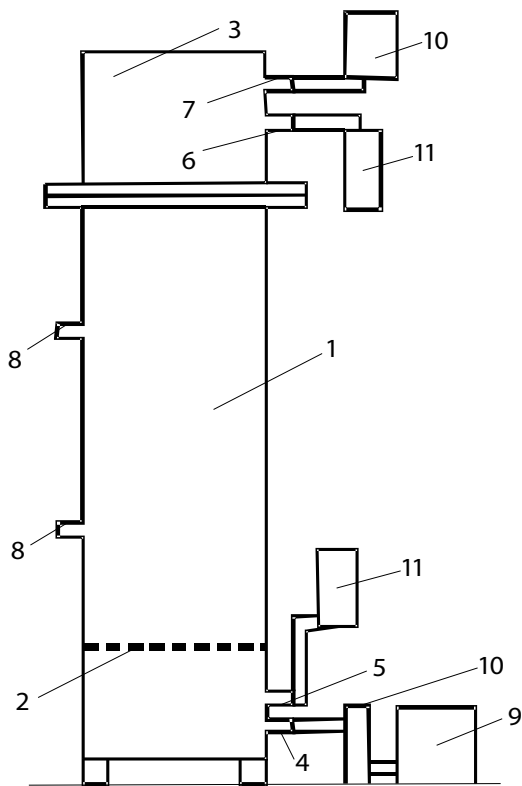


Рис. 5. Установка для исследования коэффициента проницаемости угля: 1 – камера; 2 – сетка; 3 – крышка камеры; 4 – штуцер для подачи воздуха; 5 – штуцер для подключения манометра; 6 – штуцер для подключения манометра; 7 – штуцер для подключения ротаметра; 8 – штуцера для термометров; 9 – компрессор для подачи воздуха; 10 – ротаметр; 11 – манометр

Fig. 5. A setup to study permeability coefficient of coal: 1 – a chamber; 2 – a grid; 3 – a chamber cover; 4 – a connection for air supply; 5 – a connection for a manometer; 6 – a connection for a manometer; 7 – a connection for a flow meter; 8 – a connection for temperature gauges; 9 – a compressor for air supply; 10 – a flow meter; 11 – a manometer

снижение проницаемости самого скопления угля. Подача воды в скопление угля приводит к появлению жидкости в порах и трещинах, что должно снизить проницаемость скоплений для воздуха.

Для исследования изоляционного действия увлажнения использовалась установка, приведенная на рис. 5. Уголь, раздробленный до фракции 0-10 мм, помещали в камеру 1 на сетку 2. Камера имела квадратное сечение размером 0,19 x 0,19 м. Высота слоя угля равнялась 0,9 м. Воздух подавался в камеру компрессором. Количество проходящего через уголь воздуха измеряли ротаметром, а перепад давления воздуха определяли цифровым манометром. Коэффициент проницаемости исследуемого скопления угля рассчитывали по формуле:

$$K = \frac{v\mu L}{H}, \quad (3)$$

где:  $K$  – коэффициент проницаемости скопления угля,  $\text{м}^2$ ;  $v$  – скорость фильтрации воздуха через скопление угля,

$\text{м/с}$ ;  $H$  – перепад давления газа в скоплении угля, Па;  $\mu$  – коэффициент вязкости воздуха,  $\text{кг}/(\text{м}\cdot\text{с})$ ;  $L$  – длина пути фильтрации воздуха через скопление угля, м.

Проведенные замеры показали, что коэффициент проницаемости исследуемой насыпки угля равнялся  $3,5 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2$ . Затем на уголь было подано 0,4 л воды, что соответствовало расходу  $10 \text{ л}/\text{м}^2$ , и еще 0,8 л. Замеры показали, что коэффициент проницаемости угля после подачи воды снизился до  $2,8 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2$ . Таким образом, коэффициент проницаемости раздробленного угля уменьшился после увлажнения в 1,25 раза. Соответственно в 1,25 раза сократилось количество поступающего к углю кислорода и выделяемого тепла.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что увлажнение угля воздействует на константу скорости сорбции кислорода углем, длительность инкубационного периода самовозгорания, коэффициент проницаемости скопления, а также выделение из угля метана и оксида углерода.

Увлажненный уголь поглощает меньше кислорода, чем неувлажненный, что замедляет процесс самовозгорания. Однако через 15 сут. у увлажненных проб угля сорбционная активность по отношению к кислороду становится больше, чем у необработанных. Поэтому для профилактики самовозгорания необходимо периодическое увлажнение скоплений угля. Обработка водой снижает также коэффициент проницаемости угольного скопления в 1,25 раза, что уменьшает поступление кислорода и генерацию тепла.

После увлажнения угля резко падает образование оксида углерода, однако по мере испарения воды выделение этого газа начинает увеличиваться. В эксперименте через 24-43 сут. увлажненные пробы стали выделять больше оксида углерода, чем необработанные. Орошение водой также снижает поступление метана из угля в окружающий воздух. Этот эффект длился 8 сут., затем из увлажненного угля стало выделяться больше метана. Обработка угля водой практически не повлияла на вынос углекислого газа, концентрация которого снижалась после дробления с одинаковой закономерностью для всех проб.

Увлажнение скоплений угля может использоваться для повышения безопасности угольных предприятий за счет снижения опасности самовозгорания угля, уменьшения выделения оксида углерода и метана. Для поддержания необходимого эффекта необходима повторная обработка угля водой, периодичность которой зависит от температуры, влажности и скорости движения окружающего воздуха.

### Список литературы • References

1. Скоринский А.А., Огиевский В.М. Рудничные пожары. М.: Издательство «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2011. 375 с.
2. Zeng Q., Dong J., Zhao L. Investigation of the potential risk of coal fire to local environment: A case study of Daquanhu coal fire, Xinjiang region, China. *Sci Total Environ.* 2018;(640):1478-1488.
3. Onifade M., Genc B. Spontaneous combustion of coals and coal-shales. *International Journal of Mining Science and Technology.* 2018;(28):993-940.

4. Portola V.A. Assessment of the effect of some factors on spontaneous coal combustion. *Journal of Mining Science*. 1996;32(3):212-218.
5. Dawid Szurgacz, Leszek Sobik, Jarosław Brodny. Inter gases as one of the ways to reduce the risk of endogenous fires in hard coal mines. *E3S Web of Conferences*. 2019:184-190.
6. Портола В.А., Бобровникова А.А., Син С.А., Игишев В.Г. Особенности выделения индикаторных пожарных газов при подаче азота в очаг самовозгорания угля // Безопасность труда в промышленности. 2022. № 4. С. 47-52.  
Portola V.A., Bobrovnikova A.A., Sin S.A., Igishev V.G. Special features of the release of indicator fire gases at the nitrogen supply to the foci of coal spontaneous combustion. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*. 2022;(4):47-52. (In Russ.).
7. Исследование воздействия антипирогенов на процесс самовозгорания бурого угля / В.А. Портола, О.И. Черских, С.И. Протасов и др. // Уголь. 2022. № 12. С. 54-60. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-12-54-60.  
Portola V.A., Cherskikh O.I., Protasov S.I., Seregin E.A., Shvakov I.A. Research into effects of antipyrrogens on the spontaneous combustion of brown coal. *Ugol'*. 2022;(12):54-60. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2022-12-54-60.
8. 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.
9. Lin Q., Wang S., Song S., Liang Y., Ren T. Analytical prediction of coal spontaneous combustion tendency: velocity range with possibility of self-ignition. *Fuel Processing Technology*. 2017;(159):38-47.
10. Мамаев В.В., Момот Д.И. Новый способ получения газомеханической пены на сетках / Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах. Материалы конференции. 2017. С. 140.1-140.9.
11. Xi X., Sun L., Shi Q., Tian F., Guo B. Effects of mineral admixture on properties of cement-based foam material developed for preventing coal spontaneous combustion. *Fuel*. 2023;(342):127785.
12. Ren X., Xue D., Li Y., Hu X., Shao Z., Cheng W., Dong H., Zhao Y., Xin L., Lu W. Novel sodium silicate polymer composite gels for the prevention of spontaneous combustion of coal. *Journal of Hazardous Materials*. 2019;(371):643-654.
13. Jiang Z., Dou G. Preparation and characterization of chitosan grafting hydrogel for mine-fire fighting. *ACS Omega* 2020;5(5):2303-2309.
14. Dawid Szurgacz, Magdalena Tutak, Jarosław Brodny, Leszek Sobik, Olga Zhironkina. The Method of Combating Coal Spontaneous Combustion Hazard in Goafs – A Case Study. *Energies*. 2020;13(4538):4538.
15. Акбаров Т.Г., Исраилов М.А., Махмудов Д.Р. Изучение и предупреждение самовозгораемости углей Ангренского месторождения // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2021. № 1. С. 170-177.  
Akbarov T.G., Israilov M.A., Makhmudov D.R. Analysis and prevention of spontaneous combustion of Angren coal. *Gornyy informatsionno-analiticheskij byulleten'*. 2021;(1):170-177. (In Russ.).
16. Вогман Л.П., Ильичев А.В., Кондратюк Н.В. Обеспечение пожаровзрывобезопасности при рекультивации отработанных угольных месторождений // Актуальные вопросы пожарной безопасности. 2020. № 1(3). С. 12-25.  
Vogman L.P., Ilyichev A.V., Kondratyuk N.V. Fire and explosion safety at reclamation of spent coal deposits. *Aktual'nye voprosy pozharnoj bezopasnosti*. 2020;(3):12-25. (In Russ.).
17. Sharma A., Banerjee D.D. A conceptual approach to prevention of fire in coal benches. *Mining. Sci. And Technol*. 1989;(2):133-143.
18. Портола В.А., Бобровникова А.А., Протасов С.И. Влияние температуры окружающей среды на инкубационный период и склонность угля к самовозгоранию // Безопасность труда в промышленности. 2022. № 1. С. 27–32.  
Portola V.A., Bobrovnikova A.A., Protasov S.I. Impact of ambient temperature on the incubation period and the tendency of coal to spontaneous combustion. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*. 2022;(1):27-32. (In Russ.).
19. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при переработке, обогащении и брикетировании углей» (утверждены приказом Ростехнадзора № 428 28.10.2020), в редакции приказа Ростехнадзора № 485 от 27.12.2023.

#### Authors Information

**Portola V.A.** – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor of the Department of Aerology, Labor and Naure Protection, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, 650000, Russian Federation, Deputy Head of the Department, LLC Scientific and Production Association "ALZAMIR", Kemerovo, 650036, Russian Federation, e-mail: portola2@yandex.ru

**Khramtsov V.I.** – PhD (Engineering), Head of the Department, LLC Scientific and Production Association "ALZAMIR", Kemerovo, 650036, Russian Federation, e-mail: khramtsov49@yandex.ru

**Kirenberg E.A.** – Master's student, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, 650000, Russian Federation, Engineer, LLC Scientific and Production Association "ALZAMIR", Kemerovo, 650036, Russian Federation, e-mail: Omega440@yandex.ru

#### Информация о статье

Поступила в редакцию: 18.02.2025

Поступила после рецензирования: 28.02.2025

Принята к публикации: 25.03.2025

#### Paper info

Received February 18, 2025

Reviewed February 28, 2025

Accepted March 25, 2025