

# Оценка эффективности водных составов для охлаждения очагов самовозгорания бурого угля на разрезах

В.А. Портола<sup>1</sup>, О.И. Черских<sup>2</sup>✉, С.И. Протасов<sup>3</sup>, Е.А. Серегин<sup>3</sup>, И.А. Шваков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Российская Федерация

<sup>2</sup> ООО «Солнцевский угольный разрез», г. Шахтерск, Российская Федерация

<sup>3</sup> Новационная фирма «КУЗБАСС-НИИОГР», г. Кемерово, Российская Федерация

✉ cherskikhoi@eastmining.ru

**Резюме:** Очаги самовозгорания угля наносят большой экономический урон разрезам из-за потерь угля и затрат на ликвидацию аварий, а выделяющиеся токсичные газы и высокая температура угрожают здоровью и жизни сотрудников. Необходимым условием ликвидации очагов самовозгорания является охлаждение угля. Наиболее эффективным путем тушения эндогенных пожаров является выемка нагретого угля. Охлаждение угля может происходить за счет теплообмена с атмосферой или подаваемыми хладагентами. Проведенные исследования показали, что у остывшего на воздухе бурого угля увеличивается сорбционная активность по отношению к кислороду. С ростом начальной температуры угля возрастает активность охлажденного. Так, если естественный уголь имел константу скорости сорбции кислорода 0,1348 мл/(г·ч), то остывший после нагрева до 50°C уже 0,2191 мл/(г·ч), а после 100°C этот параметр возрос до 0,3153 мл/(г·ч). Инкубационный период самовозгорания у остывшего на воздухе бурого угля значительно снижается с ростом температуры нагрева (в 2–3 раза) из-за его активации и уменьшения влажности, что увеличивает опасность повторного самовозгорания. Использование для охлаждения бурого угля воды и водных составов существенно снижает константу скорости сорбции кислорода углем и увеличивает длительность инкубационного периода самовозгорания. Из исследованных водных составов наиболее эффективным для охлаждения бурого угля оказался хлористый кальций, наименьшее действие оказало жидкое стекло. Остывание угля на воздухе приводит к интенсификации выделения оксида углерода, но охлаждение водой и водными составами в несколько раз снижает выделение опасного газа.

**Ключевые слова:** самовозгорание угля, эндогенный пожар, антипирогены, сорбция кислорода углем, инкубационный период самовозгорания, разрез, бурый уголь, охлаждение очагов самовозгорания, оксид углерода

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

**Для цитирования:** Портола В.А., Черских О.И., Протасов С.И., Серегин Е.А., Шваков И.А. Оценка эффективности водных составов для охлаждения очагов самовозгорания бурого угля на разрезах. *Горная промышленность*. 2023;(4):89–94. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-4-89-94>

## Assessment of water-based compositions efficiency for cooling place of lignite spontaneous combustion in strip mines

V.A. Portola<sup>1</sup>, O.I. Cherskikh<sup>2</sup>✉, S.I. Protasov<sup>3</sup>, E.A. Seregin<sup>3</sup>, I.A. Shvakov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation

<sup>2</sup> Solntsevsky Coal Mine LLC, Shakhtersk, Russian Federation

<sup>3</sup> KUZBASS NIIOGR Innovation Company, Kemerovo, Russian Federation

✉ cherskikhoi@eastmining.ru

**Abstract:** Places of spontaneous coal combustion cause significant economic losses to the mining operations due to coal losses and accident elimination costs, while toxic gases and high temperatures threaten the health and life of employees. Coal cooling is a necessary condition to eradicate spontaneous fire seats. The most effective way to eliminate spontaneous fires is excavation of heated coal. Coal cooling can take place due to heat exchange with the atmosphere or the supplied refrigerants. The performed studies have shown that air-cooled lignite shows increased oxygen sorption capacity. As the initial temperature of the coal goes up, the activity of cooled coal increases. Thus, if natural coal was characterized with the oxygen sorption rate constant of 0.1348 ml/(g·h), the coal cooled down upon heating up to 50°C already showed 0.2191 ml/(g·h), while with coal being heated up to 100°C this parameter went up to 0.3153 ml/(g·h). The latent time of spontaneous combustion of air-cooled lignite significantly decreases with the increasing heating temperature (2–3 times) due to lignite activation and reduction in its moisture content, which increases the danger of recurrent spontaneous firing. The use of water and water-based compositions for lignite cooling significantly reduces the coal's oxygen sorption rate constant and increases the latent time of spontaneous combustion. Calcium

chloride proved to be the most effective means for cooling lignite among the investigated water-based compositions, while liquid glass (sodium silicate) had the least effect. Air cooling of coal leads to intensified emission of carbon monoxide, while cooling with water and water-based compositions reduces the release of this hazardous gas by several times.

**Keywords:** coal spontaneous combustion, spontaneous fire, antipyrogens, oxygen sorption by coal, latent time of spontaneous combustion, strip mine, lignite, cooling of spontaneous combustion seats, carbon oxide

**Acknowledgments:** The research was financially supported by the funds of the Russian Science Foundation and the Kemerovo Region-Kuzbass No. 22-27-20004, <https://rscf.ru/project/22-27-20004/>

**For citation:** Portola V.A., Cherskikh O.I., Protasov S.I., Seregin E.A., Shvakov I.A. Assessment of water-based compositions efficiency for cooling place of lignite spontaneous combustion in strip mines. *Russian Mining Industry*. 2023;(4):89–94. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-4-89-94>

## Введение

Структура угольной промышленности России постепенно меняется в сторону увеличения добычи угля открытым способом. Так, в 2022 г. уголь добывали на 244 разрезах, а 61 разрез находился в стадии ликвидации, консервации, приостановки. Подземную добычу угля вели 59 шахт, а в 33 шахтах добыча не велась из-за консервации, ликвидации и приостановки работ. Соответственно, в 2021 г. добыча открытым способом составила 335,4 млн т, а шахтами только 113 млн т [1]. При этом для обоих способов добычи угля одним из основных видов аварий остаются пожары. Причем эндогенные пожары, возникающие от самовозгорания угля, могут существовать длительное время (иногда годами) из-за сложности обнаружения и тушения таких пожаров.

Процесс самовозгорания угля развивается очень медленно из-за низкой сорбционной активности угля по отношению к кислороду при естественной температуре окружающей среды. Для достижения температуры 80–120°C обычно требуется 30–150 сут в зависимости от активности угля, его влажности и температуры окружающей среды. Необходимым условием возникновения очагов самовозгорания является и постоянный приток кислорода в скопление угля, и углеродсодержащих пород [2]. Очаг самовозгорания локализуется в зоне, где разница между выделяемым и теряемым теплом имеет максимальное значение.

При ведении горных работ открытым способом очаги самовозгорания возникают в нарушенных пластах, скоплениях угля, угольных складах и породных отвалах, содержащих горючие компоненты. Негативными последствиями эндогенных пожаров являются потери кондиционного угля, а также опасности воздействия на людей образующихся токсичных газов и высокой температуры. Основным источником выделения тепла в процессе самовозгорания являются реакции окисления таких горючих элементов, как углерод, водород, сера, что сопровождается выделением следующих опасных газов: оксид углерода, сероводород, сернистый ангидрид.

Особенности окисления угля кислородом, приводящие к развитию самовозгорания, рассмотрены в [3; 4]. Химические процессы, происходящие в горящих породных отвалах, проанализированы в [5; 6]. Воздействие внешних условий и свойств угля на развитие процесса самовозгорания приведено в работах [7–9]. Учитывая опасность эндогенных пожаров для угольных предприятий разрабатываются способы и средства предупреждения и тушения очагов самовозгорания. Так, в [10] показано воздействие различных антипирогенов на константу скорости сорбции кислорода угля, длительность инкубационного периода самовозгорания, что позволит повысить эффективность предотвращения эндогенных пожаров.

Достаточно серьезные проблемы возникают при выборе способа и средств тушения очагов самовозгорания, возникающих на угольных карьерах. Так, вынимаемый прогретый уголь может остыть в результате теплообмена с окружающей средой, что снизит расходы на тушение, но увеличит длительность тушения. Использование хладагентов приводит к росту стоимости работ, но сокращает продолжительность ликвидации пожара. Практика показывает, что после тушения эндогенного пожара велика вероятность его рецидива. Основной причиной возрождения процесса самовозгорания является большая активность ранее прогретого угля по отношению к кислороду.

В проведенных исследованиях оценена эффективность охлаждения нагретого угля под действием атмосферного воздуха, воды и при подаче воды, различных водных составов антипирогенов, а также инертной пыли. Определено влияние хладагентов на константу скорости сорбции кислорода углем и длительность инкубационного периода самовозгорания. Эти параметры позволяют оценить возможность рецидива пожара после тушения.

## Методика проведения исследований

Для снижения расходов на ликвидацию очагов самовозгорания необходимо охлаждать разогретый уголь на начальной стадии развития пожара. Поэтому эффективность охлаждения оценивали на пробах угля, прогретых до 50°C и 100°C. Исследования проводились на буром угле. После измельчения угля в лабораторных условиях отбирали пробы с размером частиц 1–3 мм. Пробы угля прогревались в сушильном шкафу до заданной температуры и выдерживались в течение 1 ч при этой температуре. Затем одна проба остывала при естественной температуре окружающего воздуха (23 °C). Остальные пробы охлаждались дистиллированной водой, различными водными составами и инертной пылью.

После соответствующей обработки пробы угля помещали в сорбционные сосуды. После выдержки угля из сорбционного сосуда отбирали воздух для определения концентрации кислорода, метана, оксида углерода, водорода и углекислого газа. Определение константы скорости сорбции кислорода углем производилось по формуле [3]:

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

где  $V$  – объем воздуха в сорбционном сосуде, контактирующий с углем, мл;  $M$  – масса пробы угля в сосуде, г;  $\tau$  – длительность контакта воздуха с углем, ч;  $C_1$  – начальная концентрация кислорода в воздухе сорбционного сосуда, %;  $C_A$  – концентрация кислорода в сосуде через время  $\tau$ , %.

Длительность инкубационного периода самовозгорания угля рассчитывалась по следующей формуле [11]:

$$\tau_{инк} = \frac{C(T_k - T_0) + 0.6(j + g)W + q_d X}{24\alpha K_T 0,45 C_B q_o} \quad (2)$$

где  $C$  – удельная теплоемкость скопления угля;  $T_k$  – критическая температура самовозгорания угля;  $T_0$  – начальная температура угольного скопления;  $j$  – теплота испарения воды;  $g$  – удельная теплота плавления льда (учитывается только для угля, находящегося при отрицательных температурах);  $W$  – начальная влажность угольного скопления;  $q_d$  – удельная теплота десорбции метана;  $X$  – природная газоносность угля;  $\alpha$  – коэффициент усвоения кислорода воздуха;  $C_B$  – концентрация кислорода на входе в угольное скопление;  $q_o$  – удельная теплота сорбции кислорода углем;  $K_T$  – константа скорости сорбции кислорода углем (определяется при температуре от 0 до 10 °С для угля, находящегося при отрицательной температуре, и при температуре от 15 до 25°С для угля, находящегося при положительной температуре).

### Результаты исследования влияния хладагентов на разогретый уголь

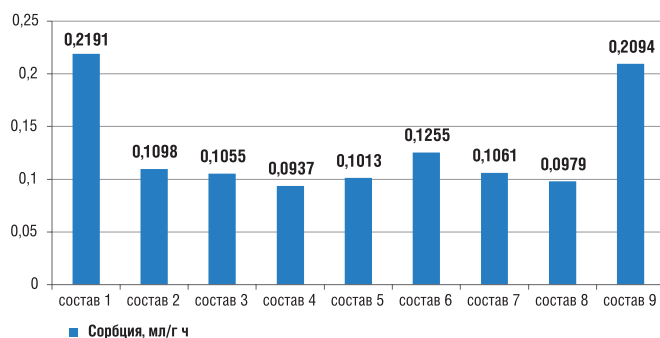
Используемые для тушения очагов самовозгорания составы должны не только быстро и с минимальными затратами охлаждать уголь, но и не допустить повторное появление очага самовозгорания. Для предотвращения рецидивов пожара следует использовать составы, позволяющие максимально снизить сорбционную активность по отношению к кислороду охлажденного угля и увеличить его влажность. Исходная проба бурого угля пласта IV имела константу скорости сорбции кислорода через 24 ч равную 0,2101 мл/(г·ч), а среднее значение этого параметра за 120 ч снизилось до 0,1348 мл/(г·ч). Начальная влажность угля составляла 15,0%. Длительность инкубационного периода самовозгорания исходного угля равнялась 89,7 сут.

В первой серии экспериментов пробы угля прогревались в сушильном шкафу и выдерживались в течение 1 ч при температуре 50°С. После нагрева одна проба остывала при естественной температуре окружающего воздуха (23°С), остальные пробы охлаждались дистиллированной водой, водными составами и инертной пылью. В качестве хладагентов использовались водные составы, рекомендуемые

в нормативных документах<sup>1</sup> для предотвращения самовозгорания угля. Достоинством составов является способность снижать скорость сорбции кислорода углем.

Масса составов, используемых для охлаждения нагретого угля, составляла 10% от массы исследуемых проб. Константу скорости сорбции кислорода углем определяли по формуле (1) через 24, 72 и 120 ч, а длительность инкубационного периода самовозгорания угля рассчитывали по выражению (2). Результаты исследования изменения константы скорости сорбции кислорода углем после охлаждения различными составами и виды хладагентов приведены в табл. 1.

На рис. 1 приведены средние арифметические значения константы скорости сорбции кислорода пробами угля, охлажденными различными составами после прогрева до 50°С.



**Рис. 1** Изменение константы скорости сорбции кислорода углем после нагрева до 50°С и охлаждения различными составами

**Fig. 1** Changes in the coal's oxygen sorption rate constant upon heating up to 50°С and cooling down using different compositions

Из приведенных результатов видно, что охлажденный на воздухе уголь сохраняет высокую сорбционную активность по отношению к кислороду. Причем константа скорости сорбции кислорода углем после нагрева до 50°С и остывания в атмосферном воздухе существенно выросла по сравнению с начальным состоянием (до прогрева). Добавка инертной пыли при охлаждении на воздухе незначительно снизила активность угля, но была больше, чем до

**Таблица 1**  
Константа скорости сорбции кислорода проб угля, охлажденных после нагрева до 50°С

**Table 1**  
Oxygen sorption rate constant of coal samples cooled down upon heating up to 50°С

№ состава	Вид обработки угля	Константа скорости сорбции кислорода пробами угля, см <sup>3</sup> /(г·ч)			Влажность, %
		Время от начала сорбции, ч			
		24	72	120	
1	Охлаждение на воздухе	0,3301	0,1894	0,1378	13,6
2	Дистиллированная вода	0,1545	0,0977	0,0771	21,5
3	7%-ный водный раствор карбамида	0,1475	0,0959	0,0730	21,5
4	10%-ный водный раствор хлористого кальция	0,1263	0,0864	0,0685	21,5
5	3%-ный водный раствор хлористого натрия	0,1394	0,0913	0,0732	21,5
6	10%-ный водный раствор жидкого стекла	0,1955	0,1018	0,0792	21,5
7	3%-ный водный раствор кальция углекислого	0,1469	0,0958	0,0758	21,5
8	3%-ный водный раствор аммония хлористого	0,1335	0,0889	0,0713	21,5
9	Инертная пыль	0,3125	0,1836	0,1321	13,6

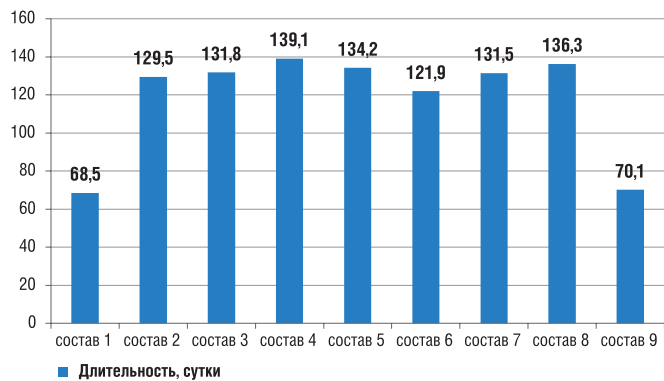
<sup>1</sup> Правила безопасности при переработке, обогащении и брикетировании углей. Утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 28 октября 2020 г. № 428

Инструкция по предупреждению экзогенной и эндогенной пожароопасности на объектах ведения горных работ угольной промышленности. Утверждена приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 27 ноября 2020 г. № Пр-469.



нагрева. Все водные составы, включая дистиллированную воду, существенно уменьшили интенсивность поглощения кислорода углем по сравнению с остывшим на воздухе и исходным. Наибольший антипирогенный эффект зарегистрирован у водного состава хлористого кальция. Наименее эффективными из водных составов оказались раствор с жидким стеклом и дистиллированная вода.

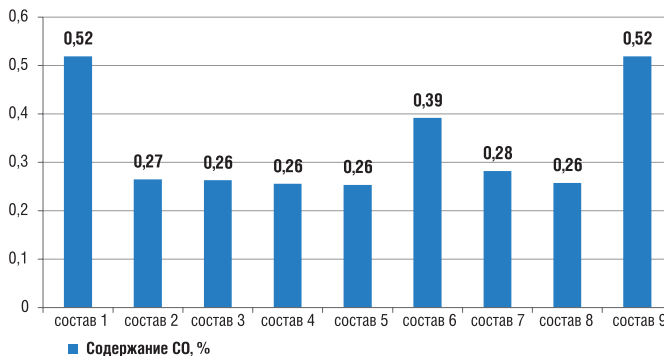
Влияние составов, используемых для охлаждения угля, разогретого до 50°C, на длительность инкубационного периода самовозгорания приведено на рис. 2.



**Рис. 2**  
Длительность инкубационного периода самовозгорания угля после нагрева до 50°C и охлаждения различными составами

**Fig. 2**  
Duration of the latent time of coal's spontaneous combustion upon heating up to 50°C and cooling down using different compositions

Из приведенных на рис. 2 результатов видно, что длительность инкубационного периода самовозгорания угля после разогрева и охлаждения на воздухе сократилась по сравнению с исходным углем (с 89,7 до 68,5 сут) за счет активизации угля и снижения его влажности. Добавка инертной пыли на разогретый уголь практически не повлияла на этот параметр по сравнению с пробой, остывшей на воздухе. Все водные составы, используемые для охлаждения разогретых проб, позволили увеличить длительность инкубационного периода самовозгорания угля. В наибольшей степени снизил опасность повторного самовозгорания состав 4 (хлористый кальций), увеличивший длительность инкубационного периода самовозгорания угля до 139,1 сут. На втором месте по эффективности оказался состав 8 (аммоний хлористый), период возрос до 136,3 сут, на третьем – состав 5 с хлористым натрием (134,2 сут). Составы с жидким стеклом и дистиллированная вода оказались наименее эффективными антипирогенами при охлаждении нагретого до 50°C угля.



**Рис. 3**  
Выделение оксида углерода из угля после нагрева до 50°C и охлаждения различными составами

**Fig. 3**  
Release of carbon monoxide from coal upon its heating up to 50°C and cooling down using different compositions

В ходе исследования измерялась концентрация оксида углерода CO, выделявшаяся в течение 24 ч из проб угля после охлаждения. Результаты приведены на рис. 3.

Приведенные данные показали, что остывший на воздухе и обработанный инертной пылью уголь выделяют максимальное количество оксида углерода, что может представлять угрозу для здоровья сотрудников разрезов. Обработка составами 2, 3, 4, 5 и 8 существенно снижает опасность выделения оксида углерода в воздух.

На следующем этапе пробы неокисленного угля прогревали в течение 1 ч в сушильном шкафу при температуре 100°C, а затем подвергали воздействию составов. Контрольная проба остывала на воздухе при температуре 23°C. За время прогрева влажность угля снизилась с 15,0% до 7,5%. После добавки водных составов влажность угля возросла до 15,91%. Результаты исследования изменения константы скорости сорбции кислорода охлажденным углем после обработки составами приведены в табл. 2.

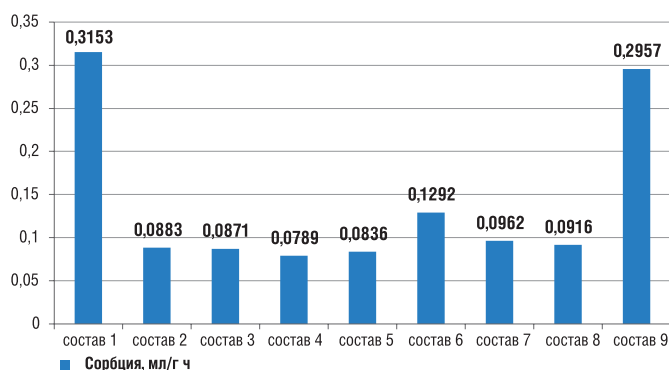
На рис. 4 приведены среднеарифметические значения константы скорости сорбции кислорода пробами угля, охлажденными на воздухе различными составами после прогрева до 100 °C.

Анализ полученных лабораторных исследований показывает, что бурый уголь, прогретый до 100°C и остывший на воздухе, сохраняет высокую активность по отношению к кислороду, что опасно из-за высокой вероятности рециди-

**Таблица 2**  
Константа скорости сорбции кислорода охлажденных после нагрева до 100°C проб угля за 120 ч

**Table 2**  
Oxygen sorption rate constant of coal samples cooled down upon heating up to 100°C in 120 hours

№ состава	Вид обработки угля	Константа скорости сорбции кислорода пробами угля, см³/г·ч			Влажность, %
		Время от начала сорбции, ч			
		24	72	120	
1	Охлаждение на воздухе	0,5204	0,2546	0,1710	7,5
2	Дистиллированная вода	0,1239	0,0770	0,0640	15,9
3	7%-ный водный раствор карбамида	0,1196	0,0771	0,0646	15,9
4	10%-ный водный раствор хлористого кальция	0,1126	0,0679	0,0563	15,9
5	3%-ный водный раствор хлористого натрия	0,1193	0,0716	0,0600	15,9
6	10%-ный водный раствор жидкого стекла	0,2039	0,1024	0,0813	15,9
7	3%-ный водный раствор кальция углекислого	0,1343	0,0839	0,0702	15,9
8	3%-ный водный раствор аммония хлористого	0,1350	0,0770	0,0629	15,9
9	Инертная пыль	0,4872	0,2325	0,1674	7,5

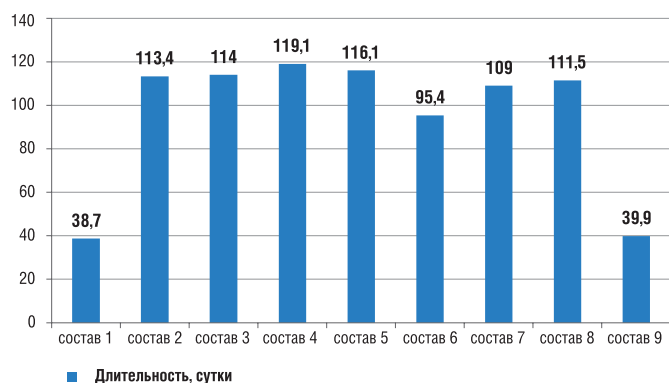


**Рис. 4**  
Изменение константы скорости сорбции кислорода углем после нагрева до 100°C и охлаждения различными составами

**Fig. 4**  
Changes in the coal's oxygen sorption rate constant upon heating up to 100°C and cooling down using different compositions

ва пожара. Причем после остывания константа скорости сорбции кислорода оказалась значительно больше, чем у исходного угля и выше, чем у прогретого до 50°C, что свидетельствует об активирующем действии прогрета угля. Не смогла предотвратить активизацию угля после прогрета и добавка инертной пыли. Охлаждение водой и водными составами значительно уменьшило константу скорости сорбции кислорода углем. Наиболее эффективным оказалось применение состава 4 (хлористый кальций), а наименьшее воздействие продемонстрировал состав 6 (жидкое стекло).

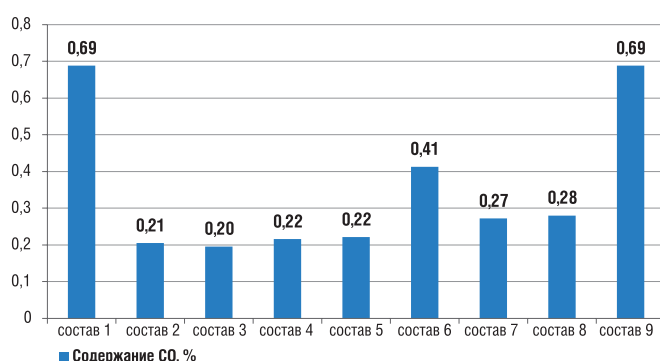
На рис. 5 показано влияние составов на длительность инкубационного периода самовозгорания бурого угля, предварительно прогретого до 100°C.



**Рис. 5**  
Длительность инкубационного периода самовозгорания угля после нагрева до 100°C и охлаждения различными составами

**Fig. 5**  
Duration of the latent time of coal's spontaneous combustion upon heating up to 100°C and cooling down using different compositions

Длительность инкубационного периода самовозгорания, прогретого до 100°C угля и остывшего на воздухе, оказалась равной 38 сут, что значительно увеличивает опасность рецидива пожара. Добавка инертной пыли незначительно увеличила этот параметр. Охлаждение прогретого угля водой и водными составами резко увеличило длительность инкубационного периода самовозгорания охлажденного угля (до 95–119 сут). Максимально эффективным для охлаждения оказался хлористый кальций. Наименьшее действие оказало жидкое стекло.



**Рис. 6**  
Выделение оксида углерода из угля после нагрева до 100°C и охлаждения различными составами

**Fig. 6**  
Release of carbon monoxide from coal upon its heating up to 100°C and cooling down using different compositions

Выделение оксида углерода из угля, предварительно прогретого до 100°C и охлаждения составом, приведено на рис. 6.

Анализ полученных результатов позволил установить, что уголь, прогретый до 100°C и охлажденный на воздухе и с добавлением инертной пыли, увеличивает выделение оксида углерода. Снижение температуры водой и водными составами резко снижает выделение этого токсичного газа. Наибольший эффект сокращения газовой выделению наблюдается при использовании составов 2, 3, 4 и 5.

**Заключение**

Лабораторными исследованиями установлено, что разбор очагов самовозгорания с охлаждением бурого угля за счет теплообмена с атмосферным воздухом приводит к активизации угля и росту опасности повторного самовозгорания. С ростом температуры угля в очаге сорбционная активность охлажденных на воздухе проб, в том числе обработанных инертной пылью, увеличивается. Охлаждение бурого угля водой и всеми водными составами значительно снизили константу скорости сорбции кислорода охлажденным углем. Максимальный антипирогенный эффект продемонстрировал состав с хлористым кальцием, минимальный – с жидким стеклом.

Длительность инкубационного периода самовозгорания бурого угля сокращается после его охлаждения в атмосферном воздухе. Чем выше была начальная температура угля, тем меньше становится инкубационный период самовозгорания, что повышает опасность рецидива пожара. Охлаждение угля водой и водными составами резко увеличивает длительность инкубационного периода самовозгорания из-за увеличения влажности и снижения скорости сорбции кислорода углем.

Охлажденный на воздухе бурый уголь увеличивает выделение оксида углерода, что может быть опасно для сотрудников разреза. Применение воды и водных составов антипирогена для охлаждения очагов самовозгорания уменьшает выделение этого токсичного газа. Причем с ростом температуры угля эффективность снижения газовой выделению водными составами возрастает.

Таким образом, можно сделать вывод о необходимости использования воды и водных составов антипирогена для охлаждения очагов самовозгорания бурого угля. Опасность повторного самовозгорания такого угля снижается, как и выделение в атмосферу оксида углерода.

## Список литературы

- Петренко И.Е. Итоги работы угольной промышленности России за январь-сентябрь 2022 года. *Уголь*. 2022;(12):7–21. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-12-7-21>
- Скочинский А.А., Огиевский В.М. *Рудничные пожары*. М.: Издательство «Горное дело»; ООО «Киммерийский центр»; 2011. 375 с.
- Веселовский В.С., Алексеева Н.Д., Виноградова Л.Н., Орлеанская Г.Л., Терпogosова Е.А. *Самовозгорания промышленных материалов*. М.: Наука; 1964. 246 с.
- Семенова С.А., Патраков Ю.Ф., Майоров А.Е. Окисление углей в пластах и методы оценки склонности углей к окислению и самовозгоранию (Обзор). *Кокс и химия*. 2020;(5):12–21.
- Зборщик М.П., Осокин В.В. *Предотвращение самовозгорания горных пород*. Киев: Техника; 1990. 176 с.
- Акулов Н.И., Прокопьев С.А., Прокопьев Е.С., Алексеева О.Л. Самовозгорание техногенно-переотложенных угленосных отложений Кузбасса. *Уголь*. 2022;(S12):53–59. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-S12-53-59>
- Lin Q., Wang S., Liang Y., Song S., Ren T. Analytical prediction of coal spontaneous combustion tendency: velocity range with possibility of self-ignition. *Fuel Processing Technology*. 2017;159:38–47. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.09.027>
- Onifade M., Genc B. Spontaneous combustion of coals and coal-shales. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2018;28(6):933–940. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2018.05.013>
- Zhang Y., Liu Y., Shi X., Yang C., Wang W., Li Y. Risk evaluation of coal spontaneous combustion on the basis of auto-ignition temperature. *Fuel*. 2018;233:68–76. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.06.052>
- 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):54–60. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-12-54-60>
- 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):27–32. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2022-1-27-32>

## References

- Petrenko I.E. Russia's coal industry performance for January-September, 2022. *Ugol'*. 2022;(12):7–21. (In Russ.) <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-12-7-21>
- Skochinsky A.A., Ogievsky V.M. *Mine fires*. Moscow: Gornoe delo; Kimmeriisky tsentr; 2011. 375 p. (In Russ.)
- Veselovsky V.S., Alekseeva N.D., Vinogradova L.N., Orleanskaya G.L., Terpogosova E.A. *Spontaneous ignition of industrial materials*. Moscow: Nauka; 1964. 246 p. (In Russ.)
- Semenova S.A., Patrakov Y.F., Majorov A.E. Assessment of the likelihood of underground coal oxidation and self-ignition: A review. *Coke and Chemistry*. 2020;63(5):223–231. <https://doi.org/10.3103/S1068364X20050063>
- Zborshchik M.P., Osokin V.V. *Prevention of spontaneous combustion of rocks*. Kiev: Tekhnika; 1990. 176 p. (In Russ.)
- Akulov N.I., Prokopiev S.A., Prokopiev E.S., Alekseeva O.L. Spontaneous combustion of technogenic redeposited coal-bearing deposits of Kuzbass. *Ugol'*. 2022;(S12):53–59. (In Russ.) <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-S12-53-59>
- Lin Q., Wang S., Liang Y., Song S., Ren T. Analytical prediction of coal spontaneous combustion tendency: velocity range with possibility of self-ignition. *Fuel Processing Technology*. 2017;159:38–47. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.09.027>
- Onifade M., Genc B. Spontaneous combustion of coals and coal-shales. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2018;28(6):933–940. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2018.05.013>
- Zhang Y., Liu Y., Shi X., Yang C., Wang W., Li Y. Risk evaluation of coal spontaneous combustion on the basis of auto-ignition temperature. *Fuel*. 2018;233:68–76. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.06.052>
- Portola V.A., Cherskikh O.I., Protasov S.I., Seregin E.A., Shvakov I.A. Research into effects of antipyrogens on the spontaneous combustion of brown coal. *Ugol'*. 2022;(12):54–60. (In Russ.) <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-12-54-60>
- Portola V.A., Bobrovnikova A.A., Protasov S.I. Influence of ambient temperature on the incubation period, and the tendency of coal to ignite spontaneously. *Occupational Safety in Industry*. 2022;(1):27–32. (In Russ.) <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2022-1-27-32>

## Информация об авторах

**Портола Вячеслав Алексеевич** – доктор технических наук, профессор, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Российская Федерация; e-mail: portola2@yandex.ru

**Черских Олег Иванович** – кандидат технических наук, директор, ООО «Солнцевский угольный разрез», г. Шахтерск, Российская Федерация; e-mail: cherskikhoi@eastmining.ru

**Протасов Сергей Иванович** – кандидат технических наук, директор, Новационная фирма «КУЗБАСС-НИИОГР», г. Кемерово, Российская Федерация; e-mail: protasov@kuzbass-niogr.ru

**Серегин Евгений Алексеевич** – главный инженер, Новационная фирма «КУЗБАСС-НИИОГР», г. Кемерово, Российская Федерация; e-mail: eugene\_s1976@mail.ru

**Шваков Игорь Анатольевич** – начальник участка, ООО «Солнцевский угольный разрез», г. Шахтерск, Российская Федерация; e-mail: shvakovia@eastmining.ru

## Information about the authors

**Vyacheslav A. Portola** – Dr. Sci. (Eng.), Professor, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation; e-mail: portola2@yandex.ru

**Oleg I. Cherskikh** – Cand. Sci. (Eng.), Director, Solntsevsky Coal Mine LLC, Shakhtersk, Russian Federation; e-mail: cherskikhoi@eastmining.ru

**Sergey I. Protasov** – Cand. Sci. (Eng.), Director, KUZBASS NIIOGR Innovation Company, Kemerovo, Russian Federation; e-mail: protasov@kuzbass-niogr.ru

**Evgeny A. Seregin** – Director, KUZBASS NIIOGR Innovation Company, Kemerovo, Russian Federation; e-mail: eugene\_s1976@mail.ru

**Igor A. Shvakov** – Site Supervisor, Solntsevsky Coal Mine LLC, Shakhtersk, Russian Federation; e-mail: shvakovia@eastmining.ru

## Article info

Received: 22.06.2023

Revised: 17.07.2023

Accepted: 19.07.2023

## Информация о статье

Поступила в редакцию: 22.06.2023

Поступила после рецензирования: 17.07.2023

Принята к публикации: 19.07.2023