

УДК 622.822

Син Сергей Александрович, научный сотрудник, к.т.н.
(КузГТУ, г. Кемерово)
Sin Sergey Alexandrovich, research fellow, PhD
(KuzSTU, Kemerovo)

**ВЛИЯНИЕ АЗОТА НА СОРБЦИОННУЮ АКТИВНОСТЬ УГЛЯ
ПРИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОМ ОКИСЛЕНИИ****INFLUENCE OF NITROGEN ON SORPTION ACTIVITY OF COAL
DURING LOW-TEMPERATURE OXIDATION**

Аннотация. В статье исследуется влияние газообразного азота на сорбционную активность угля по отношению к кислороду. Установлено, что получаемый азот активизирует уголь, что может провоцировать самовозгорание после восстановления поступления воздуха. Причиной активации угля является удаление влаги сухим газом. Установлено, что распыление воды в газообразный азот позволяет использовать газообразный азот в качестве антипирогена для предотвращения самовозгорания угля. Получены уравнения для расчета количества воды, распыляемого в азоте.

Abstract. The article examines the effect of gaseous nitrogen on the sorption activity of coal in relation to oxygen. It is established that the resulting nitrogen activates coal, which can provoke spontaneous combustion after the restoration of air supply. The reason for the activation of coal is the removal of moisture by dry gas. It is established that spraying water into gaseous nitrogen allows using gaseous nitrogen as an antipyrone to prevent spontaneous combustion of coal. Equations are obtained for calculating the amount of water sprayed into nitrogen.

Процесс самовозгорания наиболее часто возникает в скоплениях угля и наносит угольным предприятиям большой экономический ущерб [1,2]. Кроме угля очаги самовозгорания возникают в сульфидных рудах [3]. На предприятиях, добывающих и используемых уголь, зачастую эндогенные пожары развиваются в штабелях угля [4,5]. Отходы горных предприятий, содержащие определенное количество угля, также подвержены самовозгоранию [6-8].

Для обнаружения подземных эндогенных пожаров используют температурную и газовую съемки [9]. Повысить эффективность обнаружения очагов самовозгорания позволяет применение тепловизоров [10]. Качество контроля подземных пожаров возрастает при использовании радоновых съемок [11].

Особенно опасны эндогенные пожары в шахтах из-за выделения токсичных газов. Для повышения температуры скопления угля достаточно молекулярной диффузии кислорода [12]. Наибольший ущерб шахтам наносит

воспламенение горючих газов и угольной пыли [13,14]. Для предупреждения развития процесса самовозгорания уголь, находящийся в разогретом состоянии или при естественной температуре, обрабатывают растворами антипирогенов [15,16].

В шахтах для борьбы с самовозгоранием угля целесообразно использовать газообразный азот [17]. Для оценки влияния азота на сорбционную способность проведены исследования с углем марки КЖ. Навеску угля, помещенную в сорбционный сосуд, в течение 60 мин продувалась азотом со скоростью 0,5 л/мин. Параллельно исследовалась константа скорости сорбции кислорода необработанного угля и угля после воздействия дистиллированной водой. В последнем случае уголь заливался водой и выдерживался в течение 60 мин. Затем уголь помещался на сито, потом на фильтровальную бумагу для удаления воды. Результаты исследований влияния газообразного азота на константу скорости сорбции кислорода углем при температуре 20 °С представлены в таблице 1., а на удельную сорбцию кислорода углем на рисунке 1.

Таблица 1 – Влияние газообразного азота на константу скорости сорбции кислорода углем

Время сорбции, τ , ч.	Вид обработки		
	необработанный	азотом	водой
	$U, \text{см}^3/(\text{г} \cdot \text{ч})$	$U, \text{см}^3/(\text{г} \cdot \text{ч})$	$U, \text{см}^3/(\text{г} \cdot \text{ч})$
24	0,0522	0,0621	0,0181
72	0,0339	0,0363	0,0134
145	0,0288	0,0288	0,0116
241	0,0223	0,0230	0,0107

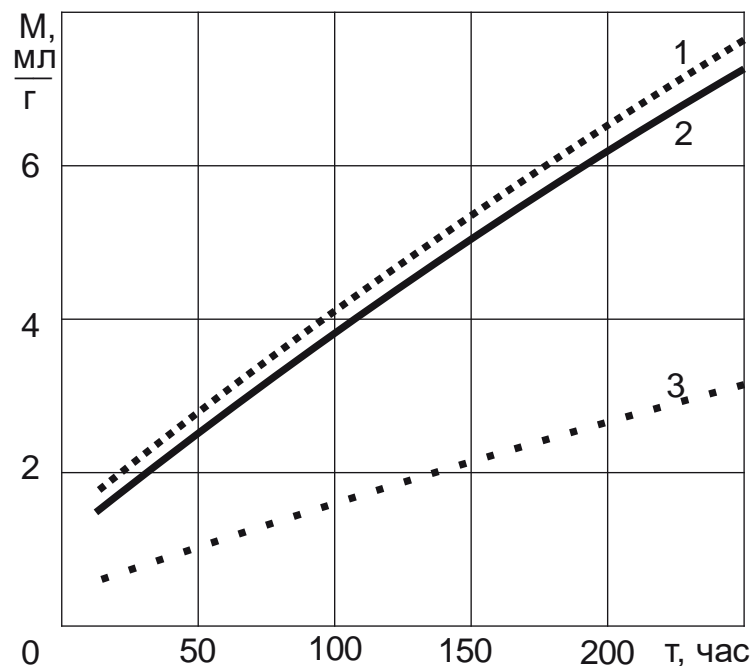


Рисунок 1 – Изменение удельной сорбции кислорода углем:
1 – обработан азотом; 2 – необработанный; 3 – обработан водой

Из результатов исследований видно, что удельная скорость сорбции кислорода углем, обработанным газообразным азотом, выше, чем у необработанного. Обработка угля водой существенно снижает константу скорости сорбции кислорода. Активирующее влияние азота на уголь можно объяснить тем, что подача сухого азота приводит к интенсивному испарению жидкости, находящейся на поверхности частиц угля. Поэтому освобожденная поверхность угля начинает активно сорбировать кислород после восстановления подачи воздуха.

Полученные результаты показывают, что подача сухого газообразного азота для профилактики самовозгорания может быть опасна в случае восстановления утечек воздуха через скопления угля, ранее заполненные азотом. Для предотвращения такого негативного воздействия можно использовать распыление воды в подаваемый азот, что приведет к ее испарению и насыщению азота водяным паром. Поступление такого увлажненного газа в скопления угля не вызовет испарение содержащейся в угле влаги и увеличение константы скорости сорбции кислорода углем. Подача увлажненного азота с частицами жидкости в разогретые скопления угля приведет также к интенсификации теплосъема из-за расхода тепла на испарение жидкости и увеличения плотности и теплоемкости подаваемой смеси по сравнению с сухим азотом.

Для предотвращения испарения содержащейся в угле воды необходимо в сухой азот подать количество воды, равное или превышающее количество пара, находящееся в насыщенном влажном газе. Определить влагосодержание газа можно по выражению:

$$D = 0,622 \frac{P_p \varphi}{P_0 - P_p \varphi}, \quad (1)$$

где D – влагосодержание газа, кг/кг; P_p – давление насыщенного водяного пара, Па; P_0 – барометрическое давление воздуха, Па; φ – относительная влажность воздуха.

Давление насыщенного водяного пара в газе зависит от температуры и может быть определено по формуле:

$$P_p = P_1 e^{-L/(RT)}, \quad (2)$$

где P_1 – постоянная, Па; L – удельная теплота парообразования, Дж/моль; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); T – термодинамическая температура, К.

Учитывая, что относительная влажность азота не должна быть менее 100 %, количество воды, распыляемой в газообразный азот, можно определить по формуле, получаемой из (1) с учетом (2):

$$D \geq 0,622 \frac{P_1 e^{-L/(RT)}}{P_0 - P_1 e^{-L/(RT)}}. \quad (3)$$

Из выражения (3) следует, что количество воды, распыляемой в сухой азот, определяется температурой газа. Так, для получения насыщенного паром азота необходимо добавить 12,7 г воды на 1 м³ газа при температуре 15 °С. При 20 °С требуется расход воды 17,1 г/м³, а при 25 °С необходимо распылить 22,8 г/м³. Превышение расчетного количества распыляемой воды приведет к появлению в азоте частиц жидкости.

Для оценки воздействия увлажненного азота на уголь была проведена третья серия экспериментов. Пробы не окисленного и предварительно прогретого угля обрабатывались насыщенным влагой азотом. Температура азота равнялась 20 °С, количество распыляемой воды составило 17,1 г/м³. Константа скорости сорбции кислорода не окисленного угля, определенная через 24 ч, равнялась 0,0522 см³/(г·ч), а после обработки насыщенным влагой азотом составила 0,0426 см³/(г·ч). Подача азота с частицами жидкости (распылено 21,0 г/м³ воды), снизило сорбционную активность угля до 0,0315 см³/(г·ч). После обработки насыщенным влагой азотом предварительно разогретого угля его сорбционная активность составила 0,0637 см³/(г·ч). Использование азота с частицами жидкости привело к снижению скорости сорбции кислорода до 0,0583 см³/(г·ч).

Проведенные эксперименты показали, что насыщенный влагой азот снижает сорбционную активность угля в 1,2-1,6 раз и его можно использовать в качестве антипирогена для предотвращения самовозгорания угля. Снижение сорбционной активности по отношению к кислороду наблюдается как у не окисленного, так и предварительно разогретого угля. Содержание в азоте частиц распыленной воды увеличивает эффективность обработки для предупреждения эндогенных пожаров.

Список литературы

1. Скочинский А.А., Огиевский В.М. Рудничные пожары. – М.: Издательство «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2011. – 375 с.
2. Игишев В.Г. Борьба с самовозгоранием угля в шахтах. – М.: Недра, 1987. – 176 с.
3. Портола В.А., Бобровникова А.А., Палеев Д.Ю., Еременко А.А., Шапошник Ю.Н. Исследование скорости сорбции кислорода самовозгорающимися сульфидными рудами. Безопасность труда в промышленности. – 2020. – № 1. – С. 57–62.
4. Портола В. А., Жданов А. Н., Бобровникова А. А. Исследование процесса самовозгорания в штабеле угля // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 10. – С. 155–162.
5. Портола В. А., Жданов А. Н., Бобровникова А. А. Анализ условий, способствующих развитию процесса самовозгорания в штабелях угля //

Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 6—1. — С. 187—197.

6. Портола В.А., Бобровникова А.А., Протасов С.И., Серегин Е.А., Еременко А.А. Оценка склонности к самовозгоранию и газовыделения углесодержащих пород отвалов и шламов угольных предприятий. Безопасность труда в промышленности. — 2021. — № 3. — С. 74–80.

7. Портола В.А., Протасов С.И., Серегин Е.А. Исследование температуры и выделения газов в очагах эндогенных пожаров на породных отвалах. Горная промышленность. 2024;(4):140–145.

8. 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.

9. Портола В.А., Бобровникова А.А., Ковалев С.В., Киренберг Е.А. Применение температурной и газовых съемок для обнаружения и локализации очагов эндогенных пожаров на выходах пластов ликвидированной шахты // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2023. № 3 (157). С. 79-90.

10. Портола В.А., Черских О.И., Протасов С.И., Серегин Е.А., Шваков И.А. Особенности проведения тепловизионной съемки для обнаружения очагов самовозгорания на угольном разрезе. Горная промышленность. 2023;(1):95–100.

11. 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.

12. Ютяев Е.П., Портола В.А., Мешков А.А., Харитонов И.Л., Жданов А.Н. Развитие процесса самонагрева в скоплениях угля под действием молекулярной диффузии кислорода // Уголь. 2018. — № 10 (1111). С. 42–46.

13. Портола В.А. Опасность самовозгорания угольной пыли. Безопасность труда в промышленности. — 2015. — № 6. — С. 36–39.

14. Портола В.А. Оценка концентрационных пределов взрывчатости угольной пыли. Вестник КузГТУ. — 2016. — № 5. — С. 16–21.

15. 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.

16. Исследование воздействия антипирогенов на процесс самовозгорания бурого угля / В.А. Портола, О.И. Черских, С.И. Протасов, Е.А. Серегин, И.А. Шваков. // Уголь. 2022. № 12. С. 54-60.

17. Син С.А. Применение азота для борьбы с самовозгоранием угля в шахтах // Вестник КузГТУ. — 2015. — № 1. — С. 167–171.