

ГОРНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА

УДК 622.03; 622.016

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ ОКИСЛЯЕМОСТИ И САМОВОЗГОРАНИЯ РУД И ГОРНЫХ ПОРОД В ЕСТЕСТВЕННОМ И ВОДОНАСЫЩЕННОМ СОСТОЯНИЯХ

А. А. Еременко¹, Т. П. Дарбинян², Ю. Н. Шапошник¹, В. А. Портола³, П. А. Цой¹

¹Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,

E-mail: eremenko@ngs.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия

²ЗФ ПАО “ГМК “Норильский никель”,

E-mail: DarbinyanTP@nornik.ru, пл. Гвардейская, 2, 663302, г. Норильск, Россия

³Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева,

E-mail: portola2@yandex.ru, ул. Весенняя, 28, 650000, г. Кемерово, Россия

Предложена методика определения степени окисляемости и самовозгорания руд и горных пород в условиях Октябрьского месторождения. Определена скорость окисления сульфидной руды, которая увеличивается после увлажнения. Приведены результаты исследований склонности к самовозгоранию руды и вмещающих пород, выделения газов в изотермических условиях и при нагревании. Установлена склонность сульфидной руды, роговиков и габбро-долеритов к самовозгоранию.

Месторождение, руда, горные породы, затопление, самовозгорание, окисляемость, сорбция

DOI: 10.15372/FTPRPI20230608

В связи с длительным нахождением выработок в затопленном состоянии возможно проявление негативных окислительных процессов в рудном массиве при ведении горных работ, т. е. повышение температуры вмещающих пород и интенсификация окислительных процессов. Исследование самовозгорания полезных ископаемых описано в [1–4]. Установлены закономерности возникновения эндогенных пожаров в угольных и рудных шахтах, штабелях угля, породных отвалах и скоплениях сульфидных руд [5–10]. Это позволило разработать разные методики оценки склонности к самовозгоранию сульфидных руд. Основным параметр для оценки склонности сульфидных руд к самовозгоранию — скорость сорбции кислорода рудой, от которой зависит количество выделяемого тепла.

В феврале 2021 г. при проведении горнопроходческих работ на руднике “Октябрьский” произошел прорыв воды с водоносного слоя на гор. – 350 м. В результате затоплению подверглись горные выработки на руднике “Октябрьский” на гор. – 906, – 957, – 1000, – 1048 м, на руд-

нике “Таймырский” — на гор. – 1050, – 1100, – 1300 м. Постепенная откачка воды из горных выработок указанных рудников осуществлялась в течение двух месяцев. В связи с длительным нахождением выработок рудника “Таймырский” в затопленном состоянии прогнозируется проявление негативных процессов в горном массиве при ведении горных работ, в том числе повышение окисляемости сульфидной халькопирит-пирротиновой руды, роговиков и габбро-долеритов при их влагонасыщении. Водонасыщение приводит к резкому повышению окисляемости и самовозгоранию сульфидных руд, что в конечном итоге может способствовать возникновению эндогенных пожаров.

Изучению процесса самовозгорания серосодержащих руд в последние годы уделялось недостаточно внимания. Практически отсутствуют новые исследования по проблеме борьбы с эндогенными пожарами на предприятиях добывающих, перерабатывающих и использующих серосодержащие руды. Для определения склонности руд к самовозгоранию применяется инструкция, выпущенная в 1981 г. [11].

Признаки развития окислительных процессов следующие:

- постепенное изменение состава рудничного воздуха в очистных забоях, характеризующееся снижением содержания кислорода и увеличением углекислоты;
- постепенное повышение в забоях температуры воздуха, отбитой руды и воды;
- постепенное повышение в рудничной воде свободной серной кислоты (свыше 0.2 – 0.3 г/л).

Признак подземного эндогенного пожара при разработке рудных месторождений — устойчивое содержание в пробах рудничного воздуха, отбираемых в очистных забоях при остановленных вентиляторах местного проветривания через каждые 3 – 4 ч, окиси углерода 0.01 % и выше или сернистого газа 0.001 % и выше в продолжение 2 сут, если присутствие этих газов не связано со взрывными работами. При подземном пожаре могут появляться в горных выработках как оба указанных газа, так и один из них.

Отработка запасов на руднике “Таймырский” ведется по следующим залежам и участкам [12]: запасы богатых руд западного и восточного флангов залежи Х-1(О); запасы богатых руд по участку “Большой Горст” залежи Х-1(О); запасы богатых руд по залежи С-2; запасы богатых руд по залежам С-3; запасы богатых руд по залежам С-3л; запасы богатых руд по залежам С-4. По минеральному составу богатые руды залежей С-2, С-3 в основном пирротиновые, богатые руды залежи Х-1(О) — халькопирит-пирротиновые, реже пентландит-халькопирит-пирротиновые, богатые руды залежи С-4 — халькопиритовые (талнахитовые), халькопирит-кубанитовые, реже кубанит-талнахитовые (моихукитовые), т. е. по классификации В. Я. Мананова [13] по минеральному составу могут относиться к умеренно или весьма склонным к самовозгоранию.

С целью уточнения степени окисляемости и самовозгорания руд и горных пород в водонасыщенном и высушенном после водонасыщения состоянии проведены испытания в лаборатории “Научно-исследовательского института горноспасательного дела” (г. Кемерово). По результатам исследований руд и вмещающих пород по степени склонности к самовозгоранию и горно-геологическим условиям залегания (мощность, угол падения рудного тела и др.) часть рудных тел Октябрьского месторождения, находящихся в границах шахтного поля рудника “Таймырский”, может быть отнесена к весьма пожароопасным, пожароопасным или непожароопасным. До стадии проектирования разработки месторождения сульфидных руд, а также других руд, вмещающие породы которых склонны к самовозгоранию, должны проводиться лабораторные исследования для определения класса склонности к самовозгоранию указанных руд и вмещающих пород.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ СКЛОННОСТИ К САМОВОЗГОРАНИЮ РУД И ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД

Богатые руды залежи С-4 по минеральному составу практически одинаковы с богатыми рудами залежей С-2, С-3 и Х-1(О). В связи с этим места отбора проб приняты в границах залежи С-4. Сульфидная руда залежи С-4 пирротин-халькопиритового состава, мелко-среднезернистая, массивная, плотная, с включениями силикатного материала и магнетита. Сложена руда из халькопирита (50–55 %), пирротина (40–45 %), пентландита (3–5 %). Силикатный материал отмечается в виде неправильной формы зерен размером 1–2 см и составляет меньше 1 % от объема руды. Магнетит в виде ксеноморфных, остроугольных, округлых и идиоморфных выделений образует каймы вокруг зерен силикатов и составляет доли процентов от объема руды [14]. Надрудная толща горных пород Октябрьского месторождения представлена габбро-долеритами, подрудная — роговиками, поэтому в зависимости от мощности рудных тел в кровле очистных выработок залегают габбро-долериты или сульфидная руда.

Оценка руд и пород месторождения по склонности к самовозгоранию и длительности инкубационного периода самовозгорания выполнена в лабораторных условиях с помощью аппаратно-программного комплекса на базе хроматографа Хроматэк-Кристалл 5000, а также низкотемпературной электропечи SNOL с вакуумным отсосом, средств измерения массы, температуры и т. п. Перечень определяемых газов: SO_2 (диоксид серы); H_2S (сероводород); CO (оксид углерода); CO_2 (двуокись углерода); O_2 (кислород); H_2 (водород); CH_4 (метан); C_2H_6 (этан); C_2H_4 (этен); C_2H_2 (этин); C_3H_8 (пропан); C_3H_6 (пропилен); C_4H_{10} (бутан); окислы азота.

Экспериментальные исследования проводились на следующих образцах руд и вмещающих пород: сульфидная руда, роговик и габбро-долерит в естественном и высушенном после водонасыщения состояниях. Образцы, насыщенные водой, высушенные, а также в естественном состоянии обрабатывались дистиллированной водой в количестве 5 % от массы пробы. Для исследования скорости сорбции кислорода рудой использовалась специальная установка, состоящая из сорбционного сосуда, имеющего верхнюю пробку, слоя стеклянных палочек, на которые помещалась проба руды, а также нижнего крана, через который отбиралась проба воздуха (рис. 1). Пробоотборная пипетка соединялась трубками через нижний кран с сорбционным сосудом и емкостью с раствором сульфата натрия. Вакуумный насос создавал разрежение в емкости. Для определения скорости сорбции кислорода рудой отобранная проба измельчалась, просеивалась на ситах для выделения фракции 1–3 мм, затем взвешивалась и определялась влажность с помощью сушильного шкафа.

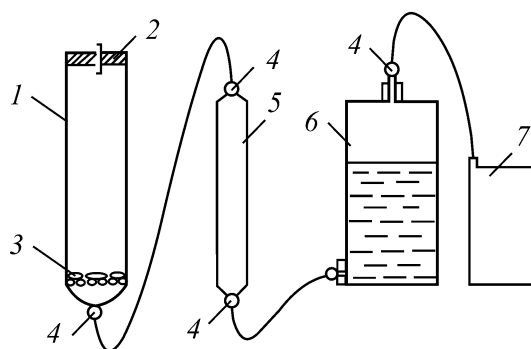


Рис. 1. Схема установки для определения скорости сорбции кислорода рудой: 1 — сорбционный сосуд; 2 — пробка; 3 — стеклянные палочки; 4 — кран; 5 — пробоотборная пипетка; 6 — емкость с раствором; 7 — вакуумный насос

Испытываемая проба руды помещалась в сорбционный сосуд, заполненный воздухом, на слой стеклянных палочек и герметически закрывалась. Опыт проходил при постоянной температуре 25 °С, для чего сорбционный сосуд помещался в термостат. Через 24 ч из сосуда отбиралась проба газа и определялась убыль в ней кислорода. Для отбора пробы газа пипетка заполнялась раствором из емкости и соединялась с сорбционным сосудом. С помощью вакуумного насоса в емкости создавалось разрежение, что приводило к перемещению в него раствора из пипетки. Воздух из сорбционного сосуда замещал раствор в пипетке. Затем краны закрывались, отобранная проба воздуха подавалась в газоанализатор для определения концентрации кислорода. Для продолжения опыта в сорбционном сосуде восстанавливался нормальный состав воздуха с помощью продувки его воздухом в течение 5 мин, затем он вновь герметизировался.

Скорость сорбции кислорода рудой вычислялась по формуле [15]:

$$U = -\frac{V}{M\tau} \ln \frac{C_\tau(1-C_0)}{C_0(1-C_\tau)}, \quad (1)$$

где V — объем воздуха, находящийся в соприкосновении с рудой, см³; M — масса пробы руды, г; τ — время контакта воздуха с рудой, ч; C_0 — начальная концентрация кислорода в сосуде, дол. ед.; C_τ — концентрация кислорода через время τ , дол. ед.

Через 24, 72 и 120 ч результаты расчета скорости сорбции кислорода рудой суммировались и определялась средняя скорость:

$$U_{25} = \frac{\sum_{i=1}^n U_i}{n}, \quad (2)$$

здесь n — число определений скорости сорбции кислорода рудой в эксперименте; U_i — текущая скорость сорбции кислорода рудой, см³/(г·ч).

Скорость окисления руды пропорциональна количеству выделяющегося сернистого газа в единицу времени. Эта скорость окисления условна, так как учитываются не все продукты окисления. Для определения условной скорости окисления при непрерывном равномерном повышении температуры руды применялась установка, схема которой представлена на рис. 2.

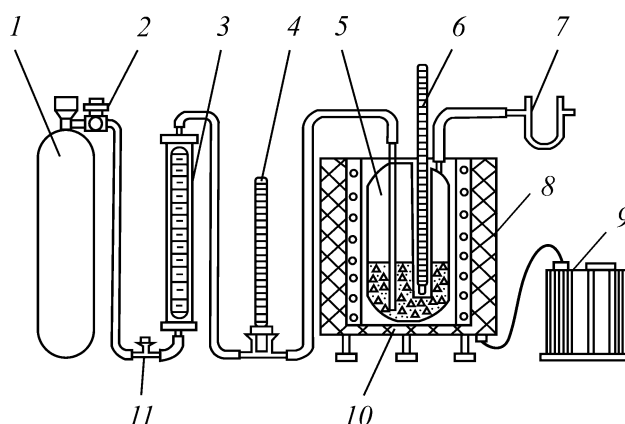


Рис. 2. Схема установки для определения условной скорости окисления руды: 1 — баллон с воздухом; 2 — редуктор; 3 — ротаметр; 4, 6 — термометры; 5 — реторта; 7 — фильтр; 8 — электронагревательная печь; 9 — трансформатор; 10 — руда; 11 — предохранительный клапан

Образец нагревался в электрической печи, в которую помещалась реакционная трубка с навеской руды массой 1 г. При проведении лабораторных исследований руд на окисление и самовозгорание через навеску пробы руды пропускался воздух с массовым расходом 125 мг/мин. Скорость тока воздуха измерялась лабораторным реометром. Отобранные пробы воздуха пропускались через хроматограф для определения концентрации SO_2 .

Температура воспламенения — минимальная температура, при которой вещество выделяет пары и газы в количестве, достаточном для продолжения горения после их воспламенения без дальнейшего добавления тепла от внешнего источника. Температура воспламенения зависит от крупности зерен, состояния поверхности образца, скорости продувания воздухом, состава газовой фазы и т. п. Образцы руды нагревались в электрической печи с периодическим появлением источника воспламенения над образцом. Температура, при которой над образцом появлялось устойчивое пламя, и есть температура воспламенения.

У отобранных проб измерялась влажность, а при оценке скорости сорбции кислорода — концентрации кислорода, метана, оксида углерода, углекислого газа, сернистого ангидрида и сероводорода. Склонность руды к самовозгоранию определялась по найденным скоростям сорбции кислорода, температуре воспламенения и условной скорости окисления. Выявлено, что серосодержащие руды после увлажнения могут увеличить скорость сорбции кислорода. Так, при взаимодействии пирита с водой и кислородом может протекать экзотермическая реакция $2\text{FeS}_2 + 7\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} = 2\text{FeSO}_4 + 2\text{H}_2\text{SO}_4 + 615.8$ ккал. Выделяемое при реакции тепло повышает температуру руды, приводя к увеличению скорости окисления серы в соответствии с законом Аррениуса:

$$K = K_0 e^{-E/RT},$$

где K_0 — предэкспоненциальный множитель; E — энергия активации; R — универсальная газовая постоянная; T — температура.

Образующаяся при реакции серная кислота способна вступать в реакцию с компонентами руды с выделением тепла, что способствует дальнейшему нагреванию руды и ускорению процесса самовозгорания скопления сульфидных руд. Учитывая возможное влияние воды на склонность сульфидных руд к самовозгоранию, дополнительно исследовались скорости сорбции, температура воспламенения и условная скорость окисления образцов после увлажнения. В пробы руд добавлялась дистиллированная вода. Влажность образцов после добавки воды увеличивалась на 5 %. Учитывая возможность снижения влажности руды в процессе хранения, исследовалась склонность к самовозгоранию, температура воспламенения и условная скорость окисления руды, высушенной после водонасыщения. Замеры содержания оксида углерода, углекислого газа, сернистого ангидрида, сероводорода и метана проведены через 24 ч после выдержки проб в сорбционном сосуде.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ГАЗОВ ИЗ РУДЫ И ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД

Одна из опасностей подземных горных работ — способность полезных ископаемых и применяемых материалов поглощать из атмосферы некоторые газы, а также выделять газы, образующиеся при химических реакциях и распаде этих материалов. В аналитической лаборатории пробы помещались в термошкаф и подогревались до определенной температуры с одновременным замером объема и состава выделяющихся газов из образца (термошкаф с вакуумным отсосом). Состав выделяющихся газов определялся с помощью газоанализаторов и хроматографа “Хроматэк – Газохром 2000”.

На первом этапе температура в термошкафу принудительно не повышалась. Отбор проб воздуха продолжался до прекращения выделения ядовитых газов и снижения содержания кислорода. На втором этапе воздух в термошкафу, в котором находилась проба руды, принудительно разогревался до повышенных температур (450–500 °С). На всех этапах одновременно замерялся объем и состав выделяющихся газов.

Для исследования процессов выделения различных газов и интенсивности поглощения атмосферного кислорода рудой отобранные пробы измельчались, просеивались на ситах для выделения фракции 1–3 мм, затем взвешивались на весах и определялась влажность с помощью сушильного шкафа. При проведении лабораторных исследований образцов руды и вмещающих пород через установку постоянно пропускаться воздух с массовым расходом 0.5 л/мин. Скорость потока воздуха измерялась лабораторным реометром. Отобранные пробы воздуха пропускались через хроматограф и газоанализаторы для определения концентрации выделяющихся газов. Отбор проб газа из емкостей с образцами руды проводился при температурах 50, 100, 150, 200, 300, 350, 400 °С. При оценке интенсивности выделения газов в отобранных пробах воздуха измерялись концентрации метана, этана, этилена, ацетилен, пропана, пропилена, бутана, кислорода, углекислого газа, оксида углерода, водорода, сернистого ангидрида, сероводорода и оксидов азота в пересчете на NO и NO₂.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам проведенных исследований сульфидная руда залежи С-4 пирротин-халькопиритового состава, габбро-долерит и роговики в естественном и высушенном после водонасыщения состояниях отнесены к несклонным к самовозгоранию. Так, руда в естественном состоянии при начальной влажности 0.01 % обладает сорбционной активностью к кислороду 0.0014 см³/(г·ч). Руда в естественном состоянии при естественной температуре окружающей среды выделяет в незначительных количествах только углекислый газ (в объемных долях 0.0510 %), оксид углерода (в объемных долях 0.0019 %) и метан (в объемных долях 0.0007 %). В процессе повышения температуры не зафиксировано выделения из руды в естественном состоянии гомологов метана (кроме следов этилена и пропилена при 150–200 °С). Содержание остальных газов приведено в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Содержание газов, выделившихся из руды в естественном состоянии при нагревании, в объемных долях, %

Температура, °С	CO ₂	O ₂	CO	H ₂	SO ₂	H ₂ S	CH ₄	Оксиды азота
50	0.0462	20.92	0.0001	0.0000	0.00002	0.0000	0.0001	0.0000
100	0.0655	20.83	0.0002	0.0000	0.01230	0.0015	0.0001	0.0000
150	0.1275	20.64	0.0009	0.0000	0.02690	0.0045	0.0002	0.0000
200	0.1010	20.62	0.0034	0.0000	0.00987	0.0007	0.0002	0.0000
300	0.0804	20.54	0.0047	0.0000	0.00899	0.0003	0.0002	0.0000
400	0.0640	20.45	0.0068	0.0000	0.00980	0.0005	0.0001	0.0000

Анализ приведенных данных показывает, что руда в естественном состоянии имеет небольшую сорбционную активность по отношению к кислороду. Причиной может быть низкая влажность образцов (0.01 %). При нагревании руда в естественном состоянии поглощает незна-

чительное количество кислорода. По мере повышения температуры до 150 °С увеличивается образование углекислого газа, а затем его содержание снижается. Выделение оксида углерода увеличивается с ростом температуры. При 100 °С возрастает выделение сернистого ангидрида и сероводорода, а при более высоких температурах снижается.

Проба сульфидной руды в естественном состоянии, увлажненной водой в количестве 5 % от массы, имеет начальную влажность 5 %. Исследование скорости сорбции кислорода рудой проводилось при температуре 24 °С в течение 120 ч. Скорость сорбции рассчитывалась по формуле (1). Среднее значение скорости сорбции U определялось по выражению (2). Результаты исследования пробы руды в естественном состоянии, увлажненной водой в количестве 5 % от массы, с учетом времени от начала сорбции составило: через 24 ч — 0.0401 см³/(г·ч); через 72 ч — 0.0165 см³/(г·ч); через 120 ч — 0.0095 см³/(г·ч).

После выдержки образца в герметично закрытом сосуде в течение 24 ч в воздухе обнаружен метан в концентрации 0.0060 %, этан, этилен, ацетилен, пропан, пропилен, изо-бутан и н-бутан не обнаружены. Ниже приведены концентрации кислорода, углекислого газа, оксида углерода, водорода, сернистого ангидрида, сероводорода, оксидов азота в пересчете на NO и NO₂ после контакта с рудой в естественном состоянии, увлажненной водой в количестве 5 % от массы, %:

CO ₂	O ₂	CO	H ₂	SO ₂	H ₂ S	Оксиды азота
0.02100	18.69000	0.00250	0.00390	0.00000	0.00000	0.00000

Видно, что сульфидная руда в естественном состоянии, увлажненная водой в количестве 5 % от массы, при естественной температуре окружающей среды выделяет оксид углерода, метан и водород. Содержание углекислого газа снижается.

Нагрев пробы руды в естественном состоянии, увлажненной водой в количестве 5 % от массы, происходил при постоянной подаче воздуха с расходом 0.5 л/мин. В процессе повышения температуры зафиксировано выделение из руды в естественном состоянии, увлажненной водой в количестве 5 % от массы, таких гомологов метана, как этан, пропан (при 150 – 200 °С). Содержание остальных газов приведено в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Содержание газов, выделившихся из руды в естественном состоянии, увлажненной водой в количестве 5 % от массы, при нагревании

Температура, °С	CO ₂	O ₂	CO	H ₂	SO ₂	H ₂ S	CH ₄	Оксиды азота
50	0.0494	20.86	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0004	0.0000
100	0.0417	20.68	0.0007	0.0000	0.0000	0.0000	0.0022	0.0000
150	0.0517	20.54	0.0017	0.0000	0.0000	0.0000	0.0043	0.0000
200	0.0633	20.39	0.0024	0.0000	0.0020	0.0004	0.0075	0.0000
300	0.0747	19.58	0.0021	0.0000	0.0187	0.0035	0.0002	0.0000

Анализ полученных данных показывает, что сорбционная активность по отношению к кислороду руды в естественном состоянии, увлажненной водой в количестве 5 % от массы, увеличивается более чем в 10 раз по сравнению с исходными образцами. Так, по данным лабораторных испытаний, скорость сорбции кислорода рудой, находящейся в естественном состоянии, составляет $U = 1.4 \cdot 10^{-3}$ мл/(г·ч) (руда относится к несклонной к самовозгоранию); для руды,

находящейся в естественном состоянии и увлажненной водой в количестве 5 % от массы — $U = 22 \cdot 10^{-3}$ мл/(г·ч) (руда относится к весьма склонной к самовозгоранию). При нагревании руды в естественном состоянии, увлажненной водой в количестве 5 % от массы, возрастает выделение углекислого газа. По мере повышения температуры до 200 °С увеличивается образование оксида углерода, а при дальнейшем нагреве его концентрация падает. При 200 °С начинается выделение сернистого ангидрида и сероводорода.

Установлено, что из роговика в естественном состоянии, увлажненного водой в количестве 5 % от массы, в незначительных количествах выделялся водород, оксид углерода и метан. Нагрев пробы роговика в естественном состоянии, увлажненного водой в количестве 5 % от массы, происходил при постоянной подаче воздуха с расходом 0.5 л/мин. В процессе повышения температуры не зафиксировано выделения из роговика большей части гомологов метана (обнаружены следы этилена, пропилена, бутана). При нагревании роговика в естественном состоянии, увлажненного водой в количестве 5 % от массы, не увеличивалось поглощение кислорода. С повышением температуры возрастало образование углекислого газа и оксида углерода. Сернистый ангидрид и сероводород при нагревании не выделялись.

Из габбро-долерита в естественном состоянии, увлажненного водой в количестве 5 % от массы, в незначительных количествах выделялись оксид углерода, метан и водород. Наблюдалось поглощение углекислого газа. Нагрев пробы габбро-долерита в естественном состоянии, увлажненного водой в количестве 5 % от массы, происходил при постоянной подаче воздуха с расходом 0.5 л/мин. С ростом температуры не зафиксировано выделение из габбро-долерита в указанном состоянии большей части гомологов метана (обнаружены следы этилена, пропилена). При нагревании габбро-долерита в естественном состоянии, увлажненного водой в количестве 5 % от массы, не возрастало поглощение кислорода. С повышением температуры увеличивалось образование углекислого газа и оксида углерода. При 50–100 °С отмечалось выделение сернистого ангидрида, при дальнейшем нагревании он не выделялся.

Ниже приведены результаты исследования температуры воспламенения, условной скорости окисления и скорости сорбции кислорода пробами сульфидной руды в естественном состоянии, увлажненной водой в количестве 5 % от массы:

Температура воспламенения, °С	Условная скорость окисления SO ₂	Скорость сорбции кислорода	Степень склонности к самовозгоранию
Не воспламеняется	> 0.096 мг/мин	$22 \cdot 10^{-3}$ мл/(г·ч)	Весьма склонна

По результатам исследования сульфидная руда в естественном состоянии, увлажненная водой в количестве 5 % от массы, отнесена к весьма склонным к самовозгоранию. Проба роговика в естественном состоянии имела начальную влажность 0.64 %. Роговик в естественном состоянии, увлажненный водой в количестве 5 % от массы, имел условную скорость окисления до 0.096 мг/мин SO₂; скорость сорбции кислорода $6 \cdot 10^{-3}$ мл/(г·ч), не воспламенялся. Таким образом, роговик в естественном состоянии, увлажненный водой в количестве 5 % от массы, отнесен к несклонным к самовозгоранию. Габбро-долерит в естественном состоянии, увлажненный водой в количестве 5 % от массы, имел условную скорость окисления до 0.096 мг/мин SO₂; скорость сорбции кислорода $13 \cdot 10^{-3}$ мл/(г·ч), не воспламенялся. По результатам исследования габбро-долерит в естественном состоянии, увлажненный водой в количестве 5 % от массы, отнесен к малосклонным к самовозгоранию.

ВЫВОДЫ

Проведенные лабораторные исследования показали, что сульфидная руда в естественном состоянии и с небольшим содержанием влаги (начальная влажность 0.01 %) обладает незначительной сорбционной активностью к кислороду и относится к несклонным к самовозгоранию. Выделение метана и оксида углерода может свидетельствовать о присутствии углерода в этих пробах. Наличие серы в руде вызывает образование сернистого ангидрида и сероводорода при нагревании.

После насыщения водой и последующего высушивания руда, роговик и габбро-долерит практически не изменяют сорбционную способность поглощать кислород, и относятся к несклонным к самовозгоранию. Выделение оксида углерода, метана, сернистого ангидрида и сероводорода изменяется незначительно.

Увлажнение руды, роговика и габбро-долерита (добавка воды в количестве 5 % от массы) резко увеличивает их сорбционную способность по отношению к кислороду. Так, сульфидная руда увеличивает поглощение кислорода в 15 раз, роговик — в 3.2 раза, а габбро-долерит — в 5.9 раза. Из-за высокой сорбционной активности по отношению к кислороду увлажненная руда отнесена к весьма склонным к самовозгоранию, габбро-долерит — к малосклонным, роговик — к несклонным к самовозгоранию.

Признаки развития окислительных процессов на Октябрьском месторождении в пределах шахтного поля рудника “Таймырский” не выявлены: отсутствует постепенное повышение в рудничной воде свободной серной кислоты; состав рудничного воздуха в очистных забоях не изменяется, в том числе отсутствует снижение содержания кислорода и увеличение углекислоты; не установлено повышение в забоях температуры воздуха, отбитой руды и воды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Скочинский А. А., Огиевский В. М.** Рудничные пожары. — М.: Горн. дело, ООО “Киммерийский центр”, 2011. — 375 с.
2. **Веселовский В. С., Алексеева Н. Д., Виноградова Л. Н., Орлеанская Г. Л., Терпигосова Е. А.** Самовозгорания промышленных материалов. — М.: Наука, 1964. — 246 с.
3. **Веселовский В. С., Виноградова Л. П., Орлеанская Г. Л., Терпигосова Е. А., Одиноква Л. В.** Прогноз и профилактика эндогенных пожаров. — М.: Наука, 1975. — 159 с.
4. **Веселовский В. С., Виноградова Л. Н., Орлеанская Г. Н., Терпигосова Е. А.** Физические основы самовозгорания угля и руд. — М.: Наука, 1972. — 148 с.
5. **Глузберг Е. И.** Теоретические основы прогноза и профилактики шахтных эндогенных пожаров. — М.: Недра, 1986. — 161 с.
6. **Portola V. A.** Assessment of the effect of some factors on spontaneous coal combustion, J. Min. Sci., 1996, Vol. 32, No. 3. — P. 212–218.
7. **Игишев В. Г.** Борьба с самовозгоранием угля в шахтах. — М.: Недра, 1987. — 176 с.
8. **Портола В. А., Храмцов В. И.** Влияние применяемых в шахтах составов на склонность угля к самовозгоранию // Безопасность труда в пром-сти. — 2017. — № 2. — С. 56–59.
9. **Скрицкий В. А.** Исследование механизма возникновения очагов самовозгорания угля и обоснование способов предотвращения эндогенных пожаров в шахте: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — Новосибирск, 2011. — 39 с.

10. **Кумыков В. Х., Кумыкова Т. М.** Технология добычи и складирования пожароопасных руд // ФТПРПИ. — 2013. — № 4. — С. 99–106.
11. **Инструкция** по предупреждению и тушению подземных эндогенных пожаров на горнорудных предприятиях министерства цветной металлургии СССР, 1981.
12. **Технический проект** разработки Октябрьского месторождения. Рудник “Таймырский”. Участок богатых руд. Изменение № 1. — Красноярск: ИГДГиГ СФУ, 2019.
13. **Манаков В. Я.** Классификация колчеданных и полиметаллических руд по степени склонности к самовозгоранию // Тр. ин-та Унипромедь. — Свердловск, 1978.
14. **Еременко А. А., Дарбинян Т. П., Шапошник Ю. Н., Усольцева О. М., Цой П. А.** Оценка физико-механических свойств руд и горных пород, подвергшихся затоплению // ФТПРПИ. — 2023. — № 5. — С. 24–31.
15. **Инструкция** по определению инкубационного периода самовозгорания угля. Серия 05. Вып. 38. — М., 2013. — 24 с.

Поступила в редакцию 13/IV 2023

После доработки 20/X 2023

Принята к публикации 16/XI 2023