

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ИЗУЧЕННОСТИ ПРИЧИН САМОВОЗГОРАНИЯ СУЛЬФИДНЫХ РУД

Ольховский Д.В., Горный институт УрО РАН, Пермь

Паршаков О.С., Горный институт УрО РАН, Пермь

Зайцев А.В., Горный институт УрО РАН, Пермь

Кузьминых Е.Г., Горный институт УрО РАН, Пермь

В работе проведен анализ текущего состояния изученности процессов самовозгорания сульфидных руд. Приведены основные факторы разогрева сульфидных руд, среди которых ключевым является превышение тепловыделений от окислительных процессов над уровнем тепловых потерь в окружающую среду. Основным фактором, определяющим уровень тепловых потерь, является геометрический размер штабеля. Отмечено, что малоизученными факторами ускорения процессов окисления сульфидных руд являются температура, фракционный и минералогический состав сульфидных руд, а также наличие взрывчатых веществ на основе аммиачной селитры. Представлен обзор мирового опыта экспериментальных исследований и методик по определению склонности сульфидных руд к самонагреву и возгоранию. Отмечается, что существующие методики и математические модели штабелей не позволяют достоверно определять условия самонагрева и самовозгорания сульфидных руд. На основе этого определены дальнейшие направления исследований по установлению условий возникновения самонагрева и возгорания сульфидных руд в подземных выработках и в штабелях руды.

Ключевые слова: сульфидные руды, эндогенные пожары, самонагрев, самовозгорание, глубокий рудник

Введение

Увеличение глубины ведения добычных работ приводит к росту температуры породного массива, и, как следствие, к ускорению окислительных процессов сульфидных руд и увеличению риска возникновения пожаров. Для предупреждения возникновения возгораний на предприятиях угольной промышленности разработана нормативно-правовая база, направленная на предупреждение пожаров [1, 2]. Аналогичных документов для сульфидных месторождений, закрепленных в России законодательно, разработано не было. Современное состояние изученности вопроса возгорания сульфидных руд не позволяет достоверно определить условия, при которых достигается разогрев до температуры воспламенения, которая, согласно многочисленным исследованиям, находится в диапазоне 280-500°C [3, 4, 5] в зависимости от фракции и минерального состава. В результате возникающие эндогенные пожары в лучшем случае приводят к финансовым потерям, обусловленным ликвидацией аварии и простоем рудника, а в худшем случае приводят к несчастным случаям и выводу части запасов за баланс.

Целью данной статьи является определение текущего состояния изученности причин самовозгорания сульфидных руд на горных предприятиях и формирование дальнейших направлений исследований по определению условий самонагрева и возгорания сульфидных руд.

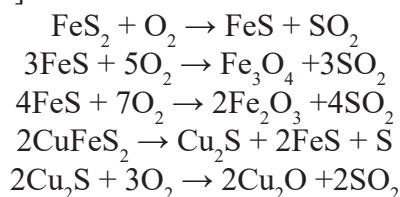
Факторы разогрева сульфидных руд

Причины разогрева и возгорания руд делятся на две основные группы – эндогенные, возникающие без внешнего воздействия источников тепла, и экзогенные, когда разогрев происходит в результате воздействия внешнего источника. К эндогенным причинам разогрева сульфидных руд можно отнести процессы окисления, адсорбирования влаги из воздуха [6], растворение в воде серной кислоты и сульфатов (которые образуются в результате окисления сульфидных руд при наличии воды [7, 8]), реагирование серной кислоты с сульфидами. В случае, если от рассматриваемой системы (например, штабель руды) тепла отводится меньше, чем выделяется, происходит самонагрев, в результате которого может быть достигнута температура, при которой начинается горение.

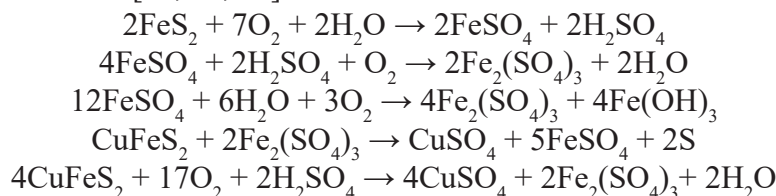
Основной причиной тепловыделений является процесс окисления руды кислородом из воздуха [9], изучению причин ускорения которого посвящено множество работ. В исследованиях выделяются следующие факторы, ускоряющие окисление сульфидных руд:

- температура [3, 10, 4, 5];
- влажность воздуха и руды [11, 6, 8, 7, 12];
- бактериологическое окисление [13, 8, 14];
- фракционный состав [4, 15, 16];
- минералогический состав [17, 9].

При контакте сульфидных руд с воздухом возможно большое количество вариантов протекания экзогенных химических реакций, конечным продуктом которых являются оксиды металлов, соли серной кислоты и сернистый газ, который представляет серьёзную угрозу для горных предприятий [18, 19]. Известен несчастный случай на Орловском месторождении в Казахстане, произошедший в результате выделения сернистого газа по причине саморазогрева сульфидных руд до температур 60-80°C. Ниже приведены примеры возможных реакций для пирита (FeS₂) и халькопирита (CuFeS₂): в сухом состоянии [20, 21]:



в присутствии воды [22, 23, 24]:



Однако необходимо отметить, что при достижении рудой температур 80-120°C практически вся вода испаряется [10, 25] и роль таких факторов ускорения окисления, как влажность воздуха и руды, бактериологическое окисление [26], а также разогрев в результате адсорбирования влаги, растворение серной кислоты [27] и сульфатов в воде существенно снижается. На основе этого можно сделать вывод о том, что эти факторы могут дать только первичный рост температуры руды, за счет которого для возгорания должны достаточно ускоряться окислительные процессы сухих сульфидных

руд, а объем выделения тепла должен быть достаточен для компенсации потерь в результате испарения влаги и снижения скорости окисления. Поэтому ключевыми параметрами для определения условий самовозгорания, на наш взгляд, являются зависимости окислительных процессов сухих сульфидных руд от температуры, фракционного и минералогического состава. В случае, если будет установлен набор параметров, при котором исследуемая сухая сульфидная руда при температурах 80-120°C может самонагреться, то необходимо проведение исследований руды в увлажненном состоянии.

Кроме окислительного процесса, наличие самонагрева определяют геометрические параметры объекта. Известно, что наиболее частым местом возникновения эндогенных пожаров являются места складирования раздробленных пород (навалы, штабеля) [28], в то время как монолитные руды (стенки выработок) не загораются. Вероятность возникновения пожара в навалах и штабелях увеличивается при росте их геометрических размеров [29]. Согласно исследованию [15], это связано с тем, что генерация тепла от окисления зависит от объема навала, а потери от его площади поверхности. Так как при увеличении навала его объем растет быстрее, чем площадь поверхности, то температура внутри навала, при которой достигается тепловое равновесие с окружающей средой, имеет более высокие значения. Помимо этого, при увеличении объема навала растет термическое сопротивление между его центром и окружающей средой, что так же приводит к росту его температуры. В результате в центре навалов достаточно больших размеров температура руды может превышать температуру воспламенения. Кроме того, в работе отмечается, что увеличение температуры окружающей среды приводит к увеличению выделения тепла и снижению его отвода породой. Таким образом, одной из актуальных задач является определение критического размера навала руды, при котором нагрев пород до температуры воспламенения исключен.

Необходимо отметить, что на критический размер штабеля влияет фракционный состав породы и скорость движения воздуха, омывающего штабель. Это определяет объем фильтрации воздуха между частицами пород в штабеле, что в свою очередь обуславливает уровень отвода тепла и поступления кислорода. Исследования фильтрации воздуха через штабель проводились в угольной промышленности [30], однако аналогичных исследований для сульфидных руд найти не удалось.

К другим причинам возникновения пожаров сульфидных руд, представляющим научный интерес, можно отнести взаимодействие руд с взрывчатыми веществами (ВВ) [17].

Согласно проводимым исследованиям установлено, что взрывчатые вещества на основе аммиачной селитры при контакте с сульфидными рудами становятся химически нестабильны и могут начать разлагаться [31, 32, 33]. В процессе разложения аммиачной селитры выделяются вода, тепло и окислитель (N_2O или O_2), что ускоряет окислительные процессы сульфидных руд. Результаты исследований [34] показали, что температура начала интенсивной потери массы при разложении исследованных ВВ снижается с 160-190°C до 120-140°C, что может значительно упростить условия возникновения очагов возгорания. Найденные исследования не позволяют дать ответ на вопрос, при каких температурных условиях и за какое время контакт взрывчатого вещества с сульфидной рудой может привести к возникновению очага пожара. Поэтому необходимо провести дополнительные изыскания, направленные на определение экзотермического эффекта, образующегося при контакте сульфидных руд с взрывчатыми веществами при различных температурах.

Экспериментальные исследования окислительных процессов

Для количественной оценки протекания окислительных процессов в большинстве отечественных работ определяется скорость сорбции кислорода 1 г руды [35, 7, 4], которая выражается в $\text{см}^3/(\text{г}\cdot\text{ч})$. В основном исследования проводятся по методике Веселовского, описанной в [15].

В работе [7] установлено, что скорость сорбции может увеличиваться на порядки при увлажнении образцов сульфидной руды (см. таблицу 1).

Таблица 1

Скорость сорбции кислорода образцов сульфидных руд в зависимости от увлажненности (при температуре 25°C)

Образец	Время от начала сорбции, ч	Скорость сорбции кислорода сухой рудой, $\text{см}^3/(\text{г}\cdot\text{ч})$	Скорость сорбции кислорода, увлажненной до 3% рудой, $\text{см}^3/(\text{г}\cdot\text{ч})$	Скорость сорбции кислорода, увлажненной до 10% рудой, $\text{см}^3/(\text{г}\cdot\text{ч})$
№ 1	24	0,0024	0,6976	0,3224
	72	0,0016	0,3875	0,3797
	120	0,0014	0,1932	0,4582
№ 2	24	0,0008	0,0144	0,01170
	72	0,0004	0,0197	0,0237
	120	0,0002	0,0215	0,0261
№ 3	24	0,0004	0,0055	0,0083
	72	0,0002	0,0084	0,0128
	120	0,0001	0,0072	0,0105
№ 4	24	0,0003	0,0108	0,0175
	72	0,0001	0,0029	0,0037
	120	0	0,0013	0,0019
№ 5	24	0,0012	0,0018	0,0019
	72	0,0010	0,0006	0,0005
	120	0,0004	0,0001	0,0001

В работе [4] представлены результаты определения скорости сорбции кислорода различными образцами сульфидных руд в зависимости от времени контакта с воздухом (см. таблицу 2). Исследования, проводимые в течение нескольких лет, показали, что скорость поглощения кислорода сульфидными рудами медленно снижается. Наибольшая скорость поглощения кислорода наблюдается в первые сутки после дробления.

В [15] приводятся результаты исследований скорости сорбции кислорода в зависимости от фракционного состава (см. таблицу 3).

Отмечается, что скорость сорбции не пропорциональна внешней поверхности зерен измельченного пирита: для двух фракций отношение скоростей меньше, чем отношение поверхностей. С повышением температуры отношение скоростей увеличивается. Эти факты указывают на то, что реагирующей является не внешняя поверхность зерен, а некоторая внутренняя.

Также в работе [15] приведены результаты экспериментальных исследований скорости сорбции кислорода в зависимости от температуры (см. таблицу 4).

Таблица 2

**Изменение скорости поглощения кислорода сульфидными рудами
в зависимости от времени контакта с воздухом**

Тип руды	Постоянная скорость поглощения кислорода за период с начала эксперимента, см ³ /(г·ч)							
	0-24 ч	50-250 ч	50-500 ч	50-1000 ч	50-2000 ч	50-5000 ч	50-0000 ч	50-15000 ч
Массивная галенит-сфалерит-пиритная руда	0,0210	0,0088	0,0065	0,0057	0,0040	0,0030	0,0021	0,0013
Полосчатая пирит-полиметаллическая руда	0,0292	0,0156	0,0124	0,0093	0,0083	0,0100	0,0054	0,0043
Массивная пирротиновая руда	0,0393	0,0224	0,0295	0,0229	0,0065	0,0140	0,0067	0,0032

Таблица 3

**Зависимость скорости сорбции кислорода при температуре 25°C
от степени измельчения пирита**

Размер зерен, мм	Отношение внешних поверхностей зерен	Скорость сорбции, см ³ /(г·ч)		Отношение скоростей сорбции	
		Образец № 1	Образец № 2	Образец № 1	Образец № 2
0,15 - 0,25	-	0,00080	0,00100	2	2,5
2 - 3	12,6	0,00040	0,00040	2	2
7 - 10	3,4	0,00020	0,00020	3	4
15 - 23	2,3	0,00007	0,00005	-	-

Таблица 4

Зависимость скорости сорбции кислорода (фракция 1-3 мм, влажность навесок 5 %)

№ образца	Подаваемый газ	Скорость сорбции, см ³ /(г·ч), при температуре, °С		
		0	25	50
1	Воздух	0,00005	0,00045	0,00210
2	Кислород	0,00025	0,00120*	0,00900
2	Кислород	0,00020	0,00200	0,00800

* значение 0,00120 возможно занижено.

При этом по данным [36] при разогреве сульфидной руды ее химическая активность по отношению к кислороду увеличивается в 1,4-1,6, а по данным [3] – в 1,5-2,0 раза на каждые 10°C роста температуры, что не соответствует результатам экспериментальных исследований, приведенных в таблице 4 в диапазоне 0-25°C. Поэтому, для более точного прогнозирования скорости сорбции кислорода в зависимости от температуры, применяют уравнение Аррениуса:

$$U(T) = U(T_0) \exp\left(-\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right), \quad (1)$$

где $U(T)$ – скорость сорбции кислорода при температуре T , К; $U(T_0)$ – скорость при температуре T_0 , К; E_a – энергия активации процесса окисления, Дж/моль; R – универсальная газовая постоянная, 8.314 Дж/(моль·К).

В данном уравнении наиболее важным параметром является энергия активации (E_a), которая характеризует зависимость скорости химического процесса от температуры (чем меньше значение E_a , тем быстрее ускоряется химическая реакция в результате роста температуры), в связи с чем её определению посвящено множество работ. В работе [37] для окисления пирита растворённым кислородом в температурном диапазоне от 20 до 40°C была определена энергия активации, равная $56,9 \pm 7,5$ кДж/моль. В работе [38] получено значение энергии активации, равное 80,9 кДж/моль. В работе [39] рассчитанные энергии активации окисления пирротина кислородом составили от 47 до 63 кДж/моль. В работе [40] отмечается, что энергия активации для никелевых и медных концентратов и смеси сфалерита и пирита находится в диапазоне 22-29 кДж/моль, на основе чего можно сделать вывод, что концентраты сульфидных руд более восприимчивы к температуре окружающей среды, чем руды. В работе также приводятся данные по энергии активации для некоторых присутствующих сульфидам химических реакций (см. таблицу 5).

Таблица 5

Энергия активации окисления сульфидных минералов

Реакция	Диапазон температур (°C)	Условия	E_a , кДж/моль
$\text{FeS} + \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{Fe}(\text{OH})_2 + 4\text{S}^0$	25-45	pH: 2,5	47-63
$\text{FeS} + \text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{SO}_2$	46-120	Окисление сухим воздухом	80-120
$\text{FeS} + 3/4\text{O}_2 (\text{водн.}) + 1/2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{S}(\text{водн.}) + \text{FeOOH}$	25	pH: 2.75–3.45	31-52
$\text{FeS}_2 + \text{O}_2 + 1/2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}^+$	3-25	Карбонизированный буферный раствор	88
$\text{FeS}_2 + \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}$	-	pH: 2	49-64
$\text{CuFeS}_2 + \text{O}_2 \rightarrow \text{Cu}_2\text{S} + 2\text{FeS} + \text{SO}_2$	330-440	-	222-282

Таким образом, энергия активации сульфидных руд находится в диапазоне 47-120 кДж/моль.

Учитывая довольно большой разброс получаемых значений E_a , для практического использования необходимо проведение исследований скорости сорбции кислорода при различных температурах.

На основе данных о скорости сорбции кислорода возможно провести сравнение сульфидных руд с более изученными в части причин самовозгорания углями. Известно, что наиболее склонным к самовозгоранию является бурый уголь, его усредненные теплофизические свойства, а также аналогичные свойства сульфидных руд приведены в таблице 6.

Данные исследований [7, 41, 15] указывают, что скорость окисления углей приблизительно в 20 раз выше, чем у сульфидных руд. В таблице 7 приведены диапазоны скорости окисления сульфидных руд и углей для фракции 1-3 мм при температуре 25°C [15], а так же дана оценка тепловыделений пород на основе количества тепла, образующегося при сорбции 1 см³ кислорода [15, 42].

Теплофизические свойства бурых углей и сульфидных руд

Тип породы	Плотность, кг/м ³	Теплоемкость, Дж/(кг·К)	Теплопроводность, Вт/(м·К)
Бурый уголь	1300	1440	0,25
Сульфидные руды	5700	479	3,2-6,5

Диапазон скорости сорбции кислорода сульфидных руд и углей в одинаковых условиях

Тип породы	Скорость сорбции кислорода, см ³ /(г·ч)	Количество тепла, выделяемого при сорбции 1 см ³ кислорода, Дж/см ³	Тепловыделение 1 г породы, Дж/(г·ч)	Тепловыделение 1 м ³ породы, Дж/(м ³ ·ч)	Прирост температуры в адиабатических условиях, °С/ч
Каменный уголь	0,0213-0,0433	12,6	0,26-0,54	338 000-702 000	0,181-0,375
Сульфидные руды	0,0022-0,0034	18,0	0,04-0,06	228 000-342 000	0,084-0,125

На основе приведенных данных можно сделать вывод, что сульфидные руды значительно менее склонны к самовозгоранию, чем уголь, по двум основным причинам. Во-первых, теплопроводность сульфидных руд в 13-26 раз выше, чем у бурого угля, что значительно ускоряет отвод тепла от штабелей породы и стенок выработки, в результате чего достигнуть температуры воспламенения значительно сложнее. Во-вторых, скорость приращения температуры в адиабатических условиях у угля в 1,5-4,5 раза выше, чем у сульфидных руд, что приводит к более длительному периоду возникновения очага пожара у сульфидных руд. Однако необходимо отметить, что мощность тепловыделений единиц объема сульфидных руд и углей близки по значениям, и в некоторых случаях могут совпадать. Из этого можно сделать вывод о том, что возникновение очагов возгорания в штабелях сульфидных руд и углей возможно при приблизительно равных значениях термического сопротивления между очагом и поверхностью штабеля.

Согласно источнику [15], предельная высота штабеля, которая позволяет безопасно хранить бурые угли в течение 4-6 месяцев, составляет 6-8 м. Если предположить, что критическая высота штабеля пропорциональна коэффициентам теплопроводности, то тогда для штабеля из сульфидных руд она должна составлять 78...208 м. При этом время достижения температуры воспламенения будет в разы больше, чем у бурых углей. Это довольно грубая оценка, не учитывающая влияние на теплопроводность раздробленности руд и фильтрации воздуха, однако она позволяет понять примерный порядок цифр критических размеров штабелей сульфидных руд. Тем не менее, необходимо отметить, что согласно экспериментальным данным [28, 43], в штабеле сульфидной руды высотой 1,5 м и шириной около 6 м, в центре наблюдался нагрев до температуры 100°С через 40-45 дней, после чего эксперимент прекращался.

Альтернативным способом определения критических размеров штабеля может послужить метод экспериментального определения условий теплового самовозгорания твердых веществ и материалов, описанный в документе [44]. Данный метод позволяет определить критическую температуру окружающей среды, размер штабеля и время индукции (время самовоспламенения штабеля при повышении температуры окружа-

ющей среды выше критического значения) на основе экспериментального исследования критической температуры самовозгорания образцов различных размеров.

Испытание образцов проводится в корзинках кубической формы при различных температурах. Время эксперимента регламентировано и зависит от размера корзинок, сторона которых не превышает 20 см, что не позволяет проводить испытания для крупных фракций. Кроме того, для расчетов требуется определение коэффициентов теплопроводности исследуемых фракций сульфидных руд. Таким образом, применимость данного метода для штабелей сульфидных руд требует практической проверки и некоторой доработки.

В зарубежной практике вместо скорости сорбции для оценки свойств самонагрева сульфидных руд применяется метод, разработанный бывшим Технологическим центром Норанды (NTC) специально для оценки самонагрева сульфидных минералов [25, 46], который называется методом NTC [48]. Метод был модифицирован в 2009 г. в Университете Макгилла [47].

Исследователи NTC предложили трёхстадийную модель самонагрева:

- стадия А начинается при температуре окружающей среды и заканчивается при 100°C или когда вся влага испарится;
- стадия В находится в промежутке температур 100-350°C;
- стадия С начинается в так называемой точке воспламенения (350°C), которая отличается высокой экзотермичностью.

На основе количества выделяемого сульфидной рудой тепла [49], определяемого с помощью разработанной лабораторной установки, они предложили диаграмму, по которой определяется способность сульфидных концентратов к самонагреву. Диаграмма поделена на 5 зон риска, от «безопасный» до «рекомендуются превентивные меры» (см. рисунок 1). По оси абсцисс берется значение количества выделяемого тепла в стадии А (при 70°C), а по оси ординат в стадии В (при 140°C).

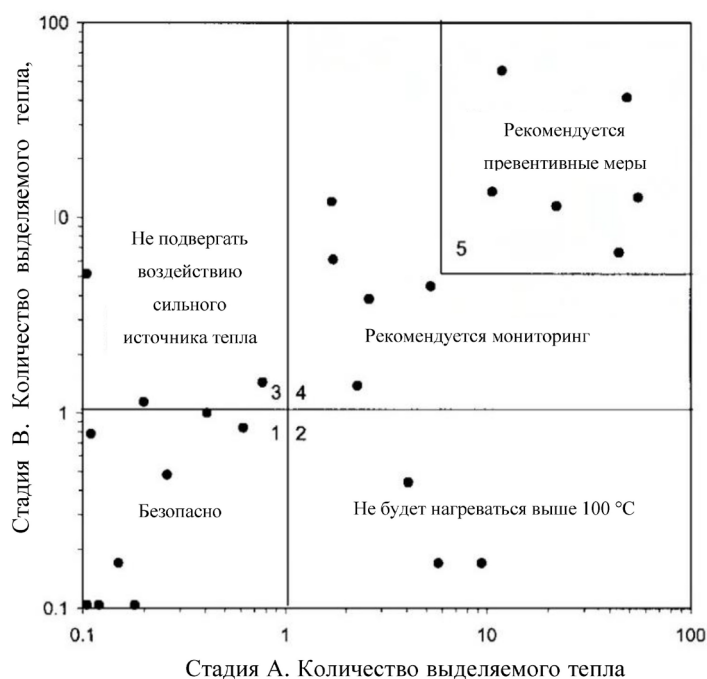


Рис. 1 Диаграмма оценки самонагрева сульфидных концентратов

Определение класса опасности руд происходит только по их мощности выделения и не учитывает их способность его отводить. Поэтому данный метод является несовершенным для определения способности руд к самонагреву. В работе [48] приведен практический опыт применения методики NTC, который показал сильную склонность к самонагреву для всех исследуемых образцов, включая эталонные образцы концентратов Thomson Mill и Clarabelle Mill, хотя на Thomson Mill и Clarabelle Mill не было зафиксировано проблем, связанных с самонагревом. В связи с этим за рубежом предпринимаются попытки по усовершенствованию существующих методик испытаний и прогнозирования самонагрева сульфидных руд.

Моделирование процессов самонагрева

Как уже было отмечено ранее, для возникновения самонагрева и возгорания сульфидных руд, помимо скорости окисления и выделения тепла, важны геометрические размеры штабеля. Контроль размеров штабелей может позволить снизить риски самовозгорания на предприятиях. Для определения критического размера штабеля необходимо учитывать множество взаимовлияющих параметров, для чего применяется численное моделирование [50]. Моделирование позволяет визуализировать процесс самонагрева и дать количественную оценку геометрическим параметрам сульфидных руд [51]. В настоящее время разработаны модели процессов окислительного самонагрева и самовозгорания угля в отвалах и местах складирования [52, 53]. Полученные результаты позволяют более точно прогнозировать и контролировать процессы самовозгорания угля. Аналогичных исследований, посвященных сульфидным рудам, достаточно мало.

В исследовании [54] разработали двумерную модель штабеля сульфидной руды на основе модели сужающегося ядра [55]. Модель довольно упрощена, так как учитывает нагрев только от биологического окисления руды и не позволяет смоделировать условия горения руды.

В недавнем исследовании [56] была разработана модель самонагрева штабеля сульфидных руд с помощью COMSOL Multiphysics, на основе динамики жидкости в пористой среде и теории теплопередачи. Модель позволяет определять динамику температур внутри штабеля, однако имеет некоторые упрощения, которые могут существенно влиять на результат. Например, мощность тепловыделения от окислительных процессов и теплопроводность штабеля задаются эмпирическим путем как функции от температуры, а снижение скорости окислительного процесса внутри штабеля в результате снижения концентрации кислорода [57] и закон Аррениуса не учитываются.

Таким образом, необходимо дальнейшее совершенствование математических моделей самонагрева штабелей сульфидных руд, в части задания тепловыделений и теплопроводности штабелей сульфидных руд.

Выводы

Приведенные в настоящей работе результаты исследований сосредоточены на анализе скорости химических реакций и процессов, протекающих на микроуровне. Безусловно, эти исследования объясняют закономерности протекания окислительных процессов сульфидных руд. Однако применить полученные результаты на практике в целях повышения уровня безопасности на горных предприятиях довольно затруднительно.

Для обоснования безопасных условий ведения горных работ или складирования сульфидной руды важно понимать, при каких параметрах штабеля и окружающей его атмосферы существует риск самовозгорания руды. В связи с чем, во-первых, требуется корректно определить объем тепловыделений (либо при помощи натуральных измерений, либо путем теоретических расчетов с учетом объема потребляемого кислорода) при более крупных фракциях и высоких температурах руды. Существующие исследования скорости сорбции проводились по методике Веселовского при низких температурах (до 50°C) и только для относительно мелких фракций (до 23 мм), что не позволяет адекватно параметризовать математические модели.

Во-вторых, необходимо знать, какое количество теплоты теряет штабель руды в окружающую его среду, для этого нужно учитывать теплопроводность штабеля и уровень фильтрации воздуха через него. Исследования, посвященные изучению теплофизических и геометрических параметров штабелей в процессе их окисления, встречаются в угольной промышленности, однако данная область для сульфидных руд малоизучена.

Кроме этого, следует отметить, что на сегодняшний день малоизучены вопросы газовой выделений сульфидных руд и их взаимодействие с взрывчатыми веществами. Ограниченный объем экспериментальных данных не позволяет получить надежные результаты прогноза объема газовой выделений и условий возгорания в результате взаимодействия с взрывчатыми веществами.

Проведенный анализ позволяет сформулировать дальнейшие направления научных исследований:

1. Разработать тепловую математическую модель штабеля сульфидных руд, учитывающую основные механизмы выделения тепла и теплообмена с окружающей средой.
2. Для параметризации модели определить скорость сорбции кислорода с учетом фактических фракций горного производства и влияния температуры, а также коэффициенты теплопроводности и фильтрации воздуха.
3. Определить объем выделения ядовитых газов при окислении сульфидных руд в зависимости от температуры и влажности образцов.
4. Провести экспериментальные исследования экзотермического эффекта, образующегося при контакте сульфидных руд с взрывчатыми веществами при различных температурах.

Решение поставленных задач совместно с проведением экспериментальных исследований и созданием методологии предупреждения пожароопасности сульфидных руд позволит снизить риск возникновения эндогенных пожаров при разработке глубоких месторождений.

Библиографический список

1. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности в угольных шахтах»: утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 8 декабря 2020 г. № 507.
2. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Инструкция по предупреждению экзогенной и эндогенной пожароопасности на объектах ведения горных работ угольной промышленности»: утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 27 ноября 2020 г. № 469.
3. Жолмагамбетов Н.Р., Медеубаев Н.А., Народхан Д., Рахимберлина А.А., Сыздыкбаева Д.С. Анализ причин самовозгорания сульфидных руд // Актуальные проблемы экологии и природопользования: сборник научных трудов XVIII Всероссийской научно-практической конференции, Москва, РУДН, 2017. – С. 168-173.

4. *Ismayilov R. T., Karimov V. M., Zeynalova S. A.* Study of spontaneous combustion of the main industrial types of sulphide ores of sulphide-polymetallic deposits of Azerbaijan // *Journal of Geology, Geography and Geoecology*. – 2023. – Vol. 32. – №. 1. – P. 59-66. DOI:10.15421/112307
5. *Крупнов Л. В., Пахомов Р. А., Цымбулов Л. Б., Цемехман Л. Ш.* Исследования кинетики окислительных процессов сульфидных концентратов различного гранулометрического состава // *Современные технологии производства цветных металлов: материалы Международной научной конференции, посвященной 80-летию СС Набойченко, Екатеринбург, 24–25 марта 2022 г.* – Екатеринбург, 2022. – Издательство Уральского Университета, 2022. – С. 236-247.
6. *Брагина П. С.* Самовозгорание угольных отвалов в Кемеровской области // *Вестник Кузбас. гос. пед. акад.* – 2013. – С. 57-64.
7. *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.
8. *Mal'tsev S. V., Chaikovskii I. I., Grishin E. L., & Isaevich A. G.* Analysis of Oxidation of Sulfide Minerals in Copper–Nickel Deposits // *Journal of Mining Science*. – 2022. – Vol. 58. – №. 2. – P. 289-299. DOI:10.1134/S1062739122020120
9. *Özdeniz A. H., Kelebek S.* A study of self-heating characteristics of a pyrrhotite-rich sulphide ore stockpile // *International Journal of Mining Science and Technology*. – 2013. – Vol. 23. – №. 3. – С. 381-386. DOI:10.1016/j.ijmst.2013.05.022
10. *Theiler, J., Beamish, B.* Spontaneous combustion of sulfide ores and concentrates – assessing the hazard likelihood // *AusIMM Bulletin*. – 2022. – URL: <https://www.ausimm.com/bulletin/bulletin-articles/spontaneous-combustion-of-sulfide-ores-and-concentrates--assessing-the-hazard-likelihood/> (дата обращения: 25.07.2025).
11. *Голынская Ф. А.* Исследование влияния генетической влаги на процесс самовозгорания углей // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2013. – № 9. – P. 183-187.
12. *Payant R., Rosenblum F., Nessel J. E., & Finch J. A.* The self-heating of sulfides: Galvanic effects // *Minerals Engineering*. – 2012. – Т. 26. – С. 57-63. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.10.019>
13. *Boon M.* The mechanism of ‘direct’ and ‘indirect’ bacterial oxidation of sulphide minerals // *Hydrometallurgy*. – 2001. – № 62. – P.67-70.
14. *Gleisner M., Herbert Jr R. B., Kockum P. C. F.* Pyrite oxidation by *Acidithiobacillus ferrooxidans* at various concentrations of dissolved oxygen // *Chemical geology*. – 2006. – Vol. 225. – №. 1-2. – P. 16-29. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2005.07.020>
15. Самовозгорание промышленных материалов / В.С. Веселовский, Н.Д. Алексеева, Л.П. Виноградова, Г.Л. Орлеанская, Е.А. Терпогосова — М.: Наука, 1964. — 248 с.
16. *Liu, H., Pan, K., Xiang, C., Ye, D., Wang, H., & Gou, X.* Mechanochemical effect of spontaneous combustion of sulfide ore // *Fuel*. – 2022. – Vol. 329. – P. 125391. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125391>
17. *Рыльникова М. В., Айнбиндер Г.И., Митишова Н.А., Гаджиева Л.А.* Исследование закономерностей возгорания сульфидных руд и пород при комбинированной разработке месторождений // *Известия Тульского государственного университета. Науки о земле*. – 2020. – №. 2. – С. 341-356.
18. *Портола В. А., Крупник Л. А., Шапошник Ю. Н., Шапошник С. Н.* Изучение влияния различных факторов на выделение ядовитых газов при самовозгорании сульфидных руд // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. – 2020. – Т. 7. – №. 1. – С. 124-130.
19. *Левин Л. Ю., Кормицков Д. С., Гришин Е. Л.* Исследование процессов изменения рудничной атмосферы для определения причин произошедшего группового несчастного случая на одном из рудников РФ // *Горное эхо*. – 2020. – №. 3. – С. 115-119.
20. *Рафиенко В. А.* О механизме выщелачивания сульфидов из шунгитовых пород // *Горный информационно-аналитический бюллетень (Научно-технический журнал)*. – 2007. – №. 9. – С. 38-48.
21. *Ермолаев А. И., Тетерев Н. А.* Анализ исследований в области взрывов пыли и их предупреждения на подземных рудниках // *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. – 2015. – №. 8. – С. 75-80.
22. *Кико Д. С.* Изменение серноколчеданных руд при техногенных процессах // *Геология, геоэкология и ресурсный потенциал Урала и сопредельных территорий*. – 2016. – №. 4. – С. 227-230.

23. Вигдергауз В. Е., Макаров Д. В., Маслобоев В. А., Белогуб Е. В., Шрадер Э. А., Бочарова И. В., Кузнецова И. Н., Саркисова Л. М., Меньшиков Ю. П. Исследование закономерностей окисления и изменения технологических свойств уральских медно-цинковых руд // Минералогия техногенеза. – 2011. – №. 12. – С. 138-160.
24. Jin, H., Pan, W., Shen, X., & Cheng, S. Nonlinear Determination Method for Self-Heating Initiative Temperature of Sulfide Ores // Complexity. – 2020. – №. 1. DOI:10.1155/2020/1709158
25. Rosenblum F., Nessel J., Spira P. Mineral Processing v Evaluation and control of self-heating in sulphide concentrates // Cim. Org. – 2001. – Vol. 94.
26. Ремезов А. В. Почему существуют эндогенные пожары? // Инновации в технологиях и образовании. – 2016. – С. 106-120.
27. Davis G. B., Ritchie A. I. M. A model of oxidation in pyritic mine wastes: part 1 equations and approximate solution // Applied mathematical modelling. – 1986. – Vol. 10. – №. 5. – P. 314-322. [https://doi.org/10.1016/0307-904X\(86\)90090-9](https://doi.org/10.1016/0307-904X(86)90090-9)
28. Liu, H., Wang, Z., Zhong, J., & Xie, Z. Early detection of spontaneous combustion disaster of sulphide ore stockpiles // Technical Gazette/Tehnički Vjesnik. – 2015. – Vol. 22. – №. 6. DOI:10.17559/TV-20150522125313
29. Греков С. П., Пашковский О. П. Минимальные пожаробезопасные размеры породных отвалов угольных шахт // Научный вестник НИИГД Респиратор. – 2019. – №. 1. – С. 86-93.
30. Портола В. А., Жданов А. Н., Бобровникова А. А. Анализ условий, способствующих развитию процесса самовозгорания в штабелях угля // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2022. – №. 6-1. – С. 187-197.
31. Рьльникова М. В., Митишова Н. А. Методика исследований взрывоопасности убогосульфидных руд при подземной отработке колчеданных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2019. – №. 9. – С. 41-51.
32. Козырев С. А., Власова Е. А. Исследование химического взаимодействия аммиачной селитры с сульфидсодержащими минералами в составе гематит-магнетитовых кварцитов Оленегорского месторождения // Вестник Кольского научного центра РАН. – 2019. – №. 2. – С. 54-60.
33. Маслов И. Ю., Горинов С. А. Вопросы экспериментального обоснования безопасного применения аммиачно-селитренных ВВ в сульфидсодержащих горных породах // Взрывное дело. – 2020. – №. 126-83. – С. 68-84.
34. Савин П. И., Петров Е. А. Исследование химической стабильности промышленных ВВ в сульфидных рудах. // Южно-сибирский научный вестник. – 2023. – №. 5. – С. 192-198.
35. Ismayilov, R.T. (1975). Oxidizing activity of sulfide ores. Sat. «Safety, labor protection and mine rescue business», Vol. 10, P. 37-43
36. Инструкция по предупреждению и тушению подземных эндогенных пожаров на горнорудных предприятиях министерства цветной металлургии СССР. 1981г., 44 с.
37. McKibben M. A., Barnes H. L. Oxidation of pyrite in low temperature acidic solutions: Rate laws and surface textures // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1986. – Vol. 50. – №. 7. – P. 1509-1520. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(86\)90325-X](https://doi.org/10.1016/0016-7037(86)90325-X)
38. Ilyas A., Hawboldt K., Khan F. Thermal stability investigation of sulfide minerals in DSC // Journal of hazardous materials. – 2010. – Vol. 178. – №. 1-3. – P. 814-822. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.01.149>
39. Janzen M. P., Nicholson R. V., Scharer J. M. Pyrrhotite reaction kinetics: reaction rates for oxidation by oxygen, ferric iron, and for nonoxidative dissolution // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2000. – Vol. 64. – №. 9. – P. 1511-1522. DOI:10.1016/S0016-7037(99)00421-4
40. Ngabe B., van der Spuy J. E., Finch J. A. Estimating activation energy from a sulfide self-heating test // Minerals Engineering. – 2011. – Vol. 24. – №. 15. – P. 1645-1650. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.08.019>
41. Портола В. А., Торосян Е. С. Влияние антипирогенов на сорбционную активность разогретого угля // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2016. – №. 3 (115). – С. 15-21.
42. Li S. H., Parr S. W. The oxidation of pyrites as a factor in the spontaneous combustion of coal // Industrial & Engineering Chemistry. – 1926. – Vol. 18. – №. 12. – P. 1299-1304.
43. Pan, W., Wu, C., Li, Z. J., Wu, Z. W., & Yang, Y. P. Evaluation of spontaneous combustion tendency of sulfide ore heap based on nonlinear parameters // Journal of Central South University. – 2017. – Vol. 24. – №. 10. – P. 2431-2437.

44. ГОСТ 12.1.044-2018 «Система стандартов безопасности труда. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения»
45. *Rosenblum F., Spira P., Konigsmann K. V.* Evaluation of hazard from sulphide oxidation // Proceedings of the 141 h International Mineral Processing Congress, Paper IX-2. – 1982.
46. *Rosenblum F., Spira P.* Evaluation of hazard from self-heating of sulphide rock // CIM bulletin. – 1995. – Vol. 88.
47. *Wang X., Rosenblum, F., Nasset, J. E., Finch, J. A., & Somot, S.* Oxidation, weight gain and self-heating of sulphides. – 2009.
48. *Dai Z.* Development of an experimental methodology for sulphide self-heating studies and the self-heating tendency of Vale's Voisey's Bay Concentrator products // Minerals Engineering. – 2016. – Vol. 92. – P. 125-133. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.03.006>
49. *Ngabe B., Finch J. A.* Self-heating: Estimation of the heat release coefficient QA for Ni-and Cu-concentrates and sulphide mixtures // Minerals Engineering. – 2014. – Vol. 64. – P. 126-130. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.05.027>
50. *Bustamante Rúa, M.O., Daza Aragon, A.J., Bustamante Baena, P.*, 2019. A study of fire propagation in coal seam with numerical simulation of heat transfer and chemical reaction rate in mining field // International Journal of Mining Science and Technology. – 2019. – Vol. 29. – №. 6. – P. 873-879. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2019.09.003>.
51. *Yang, S., Hu, X., Liu, W.V., Cai, J., Zhou, X.* Spontaneous combustion influenced by surface methane drainage and its prediction by rescaled range analysis // International Journal of Mining Science and Technology. – 2018. – Vol. 28. – №. 2. – P. 215-221. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.12.004>.
52. *Yang, S., Zhou, B., Wang, C.*, 2021. Investigation on coal spontaneous combustion in the gob of Y type ventilation caving face: A case study. Process Saf. Environ. 148, P. 590–603. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.11.024>.
53. *Zhou, A., An, J., Wang, K., Zhang, J., Liu, Y., Wang, J., Si, G., Wang, W.*, 2024. Modeling and parametric analysis of low-temperature oxidative self-heating in coal stockpiles driven by natural convection. Fuel 361, 130670. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.130670>
54. *Sidborn, M., Casas, J., Martinez, J., & Moreno, L.* Two-dimensional dynamic model of a copper sulphide ore bed //Hydrometallurgy. – 2003. – Т. 71. – №. 1-2. – С. 67-74. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(03\)00178-6](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(03)00178-6)
55. *Levenspiel O.* Chemical reaction engineering. – John wiley & sons, 1998.
56. *Liu, W., Huang, Y., Yin, H., Yang, F., & Hong, Y.* Multi-physics modelling and simulation on the spontaneous heating of sulfide ores // Process Safety and Environmental Protection. – 2025. – P. 107304. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2025.107304>
57. *Steinepreis M.* Investigation of gas transport rates through a covered waste rock pile and synchrotron studies on the sulfide oxidation reaction: Doctoral dissertation – University of Waterloo, 2017.

Благодарности:

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания (рег. номер НИОКТР: 126012716039-2)

Для цитирования:

Ольховский Д.В., Паршаков О.С., Зайцев А.В., Кузьминых Е.Г. Анализ современного состояния изученности причин самовозгорания сульфидных руд // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2026 – № 1. – С. 46–59. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2026.1.4>

Сведения об авторах:

Ольховский Дмитрий Владимирович, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории развития горного производства, Горный институт УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН («ГИ УрО РАН»), 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78а; e-mail: demexez@gmail.com, ORCID 0009-0009-6370-149X

Паршаков Олег Сергеевич, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории развития горного производства, «ГИ УрО РАН»; e-mail: olegparshakov@gmail.com, ORCID 0000-0001-5545-442X
Зайцев Артем Вячеславович, доктор технических наук, заведующий лабораторией развития горного

производства, «ГИ УрО РАН»; e-mail: artem.v.zaitsev@yandex.ru, ORCID 0000-0002-2314-0482
Кузьминых Евгений Геннадьевич, инженер сектора промышленной безопасности, «ГИ УрО РАН»;
e-mail: kuzminykhvgeniy@gmail.com, ORCID 0009-0005-9596-8050

ANALYSIS OF THE CURRENT STATE OF KNOWLEDGE OF THE CAUSES OF SPONTANEOUS COMBUSTION OF SULFIDE ORES

Olkhovsky D.V., Parshakov O.S., Zaitsev A.V., Kuzminykh E.G.

Mining Institute UB RAS, Perm

This paper analyzes the current state of knowledge of the spontaneous combustion of sulfide ores. The main factors affecting the heating of sulfide ores are presented, including the excess of heat release from oxidation processes over heat loss to the environment. The primary factor determining the level of heat loss is the geometric size of the waste heap. It is noted that little-studied factors accelerating sulfide ore oxidation include temperature, fractional and mineralogical composition of sulfide ores, as well as the presence of ammonium nitrate-based explosives. A review of international experimental research and methods for determining the susceptibility of sulfide ores to spontaneous heating and combustion is presented. It is noted that existing methods and mathematical models of waste heaps do not allow for the reliable determination of the conditions for spontaneous heating and combustion of sulfide ores. Based on this, further research directions have been identified to determine the conditions for spontaneous heating and combustion of sulfide ores in underground workings and waste heaps of ore stored on the surface.

Keywords: *sulfide ores, endogenous fires, spontaneous heating, spontaneous combustion, deep mine*

Поступила в редакцию: 11.02.2026

Принята к публикации: 06.04.2026