

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Научная статья

УДК 546.77:669.283

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-6-773-781>

Термодинамическое моделирование обжига сульфидного молибденового концентрата с гидроксидом кальция

Дмитрий Сергеевич Алешин^{1✉}, Алексей Геннадьевич Крашенинин²,
Полина Владимировна Зайцева³, Игорь Николаевич Танутров⁴

¹⁻⁴Институт металлургии Уральского отделения РАН, г. Екатеринбург, Россия

¹dmitriy.aleshin1@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-2404-5452>

²agkrash@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-7321-1509>

³zaitcevapolina@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-8401-7867>

⁴intan38@live.ru, <http://orcid.org/0000-0001-8610-8749>

Резюме. Цель – определение условий формирования CaMoO_4 , CaSO_4 , $\text{Ca}(\text{ReO}_4)_2$ при окислении MoS_2 и ReS_2 в присутствии $\text{Ca}(\text{OH})_2$. В качестве исходного сырья для термодинамического моделирования окислительного обжига в присутствии добавки $\text{Ca}(\text{OH})_2$ выбран концентрат Южно-Шамейского месторождения, расположенного в Свердловской области, с содержанием 37% масс. Mo и 0,005% масс. Re. Термодинамическое моделирование по определению оптимального количества кальцийсодержащей добавки проводили при следующих массовых соотношениях: молибденовый концентрат : $\text{Ca}(\text{OH})_2$ = 1:0,8, 1:1, 1:1,2 и 1:1,5 в диапазоне температур 100–800°C, с шагом 100°C, давлении системы 0,1 МПа в атмосфере воздуха (мольное соотношение: молибденовый концентрат + $\text{Ca}(\text{OH})_2$: воздух = 1:5). Данные по содержанию всех компонентов в пробе вводились в программный комплекс HSC 6.1 в молях. Показаны основные реакции окислительного обжига молибденового концентрата в присутствии гидроксида кальция. Установлено, что основными фазами, образующимися в результате обжига, являются CaSO_4 , CaSO_3 , MoO_3 , CaMoO_4 , CaMoO_3 , CaReO_4 . Изучено влияние температуры на образование основных газообразных продуктов при различном массовом соотношении молибденового концентрата и $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Установлено, что при соотношении в пробе 1:1 молибденового концентрата и $\text{Ca}(\text{OH})_2$ до 600°C не наблюдается выделения сернистого ангидрида выше значений предельно допустимых концентраций. На основе рассчитанных термодинамических данных выполнено моделирование процесса обжига молибденового концентрата с гидроксидом кальция. Установлено оптимальное соотношение, необходимое для успешного протекания процесса: молибденовый концентрат : $\text{Ca}(\text{OH})_2$ = 1:1 по массе. Термодинамическое моделирование показало, что в интервале температур 100–600°C при использовании $\text{Ca}(\text{OH})_2$ не происходит потерь рения и молибдена, выделение серы не превышает 10 мг/м³.

Ключевые слова: производство молибдена, сульфидный молибденовый концентрат, пылегазоочистка, энергия Гиббса, сернистый ангидрид, обжиг молибденового концентрата

Благодарности: Работа выполнена по государственному заданию ИМЕТ УрО РАН в рамках программы фундаментальных исследований государственных академий № госрегистрации: 0396-2019-0005.

Для цитирования: Алешин Д. С., Крашенинин А. Г., Зайцева П. В., Танутров И. Н. Термодинамическое моделирование обжига сульфидного молибденового концентрата с гидроксидом кальция // iPolytech Journal. 2021. Т. 25. № 6. С. 773–781. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-6-773-781>.

METALLURGY AND MATERIALS SCIENCE

Thermodynamic modelling of roasting of molybdenum sulphide concentrate with calcium hydroxide

Dmitriy S. Aleshin^{1✉}, Aleksey G. Krashenin², Polina V. Zaitseva³, Igor N. Tanutrov⁴

¹⁻⁴Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

¹dmitriy.aleshin1@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-2404-5452>

²agkrash@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-7321-1509>

³zaitcevapolina@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-8401-7867>

⁴intan38@live.ru, <http://orcid.org/0000-0001-8610-8749>

Annotation. This work aims to determine the conditions for the CaMoO_4 , CaSO_4 , $\text{Ca}(\text{ReO}_4)_2$ formation during oxidation of MoS_2 and ReS_2 in the presence of $\text{Ca}(\text{OH})_2$. The concentrate from the Yuzhno-Shameyskoye deposit in the Sverdlovsk region, having 37% wt. Mo and 0.005% wt. Re, was selected as a feedstock for thermodynamic modelling of sweet roasting in the presence of $\text{Ca}(\text{OH})_2$. To determine the optimal amount of calcium-containing additives, the thermodynamic modelling was carried out using the following mass ratios: molybdenum concentrate: $\text{Ca}(\text{OH})_2 = 1:0.8, 1:1, 1:1.2$ and $1:1.5$ in the temperature range of $100\text{--}800^\circ\text{C}$, with a step of 100°C , system pressure of 0.1 MPa in the air (molar ratio: molybdenum concentrate + $\text{Ca}(\text{OH})_2$: air = 1:5). The content of all sample components in moles was entered into the HSC 6.1 software package. The main reactions associated with the sweet roasting of molybdenum concentrate in the presence of calcium hydroxide were shown. It was established that the main phases formed as a result of roasting comprise CaSO_4 , CaSO_3 , MoO_3 , CaMoO_4 , CaMoO_3 and CaReO_4 . The effect of temperature on the formation of the main gaseous products was studied under different mass ratios of molybdenum concentrate and $\text{Ca}(\text{OH})_2$. It was found that up to 600°C , with molybdenum concentrate to $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ratio of 1:1, the concentrations of released sulphurous anhydride are lower than the maximum permissible concentrations. The calculated thermodynamic data was used for modelling the roasting process of molybdenum concentrate with calcium hydroxide. An optimal ratio necessary for the successful process operation was established: molybdenum concentrate: $\text{Ca}(\text{OH})_2 = 1:1$ by weight. Thermodynamic modelling showed that, in the temperature range of $100\text{--}600^\circ\text{C}$ when using $\text{Ca}(\text{OH})_2$, no rhenium and molybdenum loss is observed, the release of sulfur is less than 10 mg/m^3 .

Keywords: molybdenum production, sulfide molybdenum concentrate, dust and gas purification, Gibbs energy, sulfur dioxide, roasting of molybdenum concentrate

Acknowledgments: The research was performed by the state assignment of the Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences within the framework of the program of fundamental research of state academies. State registration No. 0396-2019-0005.

For citation: Aleshin D. S., Krashenin A. G., Zaitseva P. V., Tanutrov I. N. Thermodynamic modelling of roasting of molybdenum sulphide concentrate with calcium hydroxide. *iPolytech Journal*. 2021;25(6):773-781. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-6-773-781>.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в России и в мире молибден производят по технологии, включающей в себя обжиг сульфидного молибденового концентрата для снижения содержания серы в огарке [1]. Данный способ приносит непоправимый вред окружающей среде, так как в атмосферу выбрасывается значительная часть сернистого ангидрида, поэтому во всем мире ведутся разработки альтернативных экологически чистых технологий переработки молибденового сырья [2–14]. Для предотвращения этих выбросов на заводах устанавливаются дорогостоящие системы пылегазоочистки, что в разы повышает стоимость производства молибдена. В Институте металлургии Уральского отделения РАН продолжают исследования по поиску экологически чистой технологии производства молибдена и рения из сульфидных концентратов путем обжига концентратов с добавкой $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [15, 16].

Сочетание теоретического и экспериментального методов позволяет существенно сократить время и расход материалов в ходе

разработки, испытаний и масштабирования технологий. Предварительное обоснование режимов процессов обжига целесообразно проводить теоретически [17]. Данный подход реализуют с помощью термодинамического моделирования, которое заключается в анализе поведения многокомпонентной гетерогенной высокотемпературной системы на основе расчета ее полного равновесного химического состава в экстремуме термодинамического потенциала (максимизация энтропии или минимизация энергии Гиббса) при учете большинства потенциально возможных в равновесии компонентов [18, 19]. Кроме того, теоретически оценена возможность протекания рассматриваемых реакций между молибденовым концентратом и кальцийсодержащей добавкой. Термодинамическое моделирование и оценка возможности протекания реакций выполнена с помощью программного комплекса HSC 6.1.

Цель работы: определение условий формирования CaMoO_4 , CaSO_4 , $\text{Ca}(\text{ReO}_4)_2$ при окислении MoS_2 и ReS_2 в присутствии $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

В представленной работе для обоснования технологии и выбора оптимальных параметров (температура, масса добавки) окислительного обжига сульфидного молибденового концентрата с добавкой $\text{Ca}(\text{OH})_2$ проведено термодинамическое моделирование. В качестве исходного сырья для окислительного обжига в присутствии добавки $\text{Ca}(\text{OH})_2$ выбран концентрат Южно-Шамейского месторождения, которое расположено в Свердловской области. Согласно атомно-эмиссионному с индуктивно-связанной плазмой анализу, химический состав концентрата приведен в табл. 1.

С целью выбора оптимального количества добавки нами выполнено термодинамическое моделирование при массовых соотношениях: молибденовый концентрат: $\text{Ca}(\text{OH})_2 = 1:0.8, 1:1, 1:1.2$ и $1:1.5$. Содержание всех компонентов пробы вводили в программный комплекс HSC 6.1 в молях. В термодинамической базе этого комплекса имеются свойства оксидов, пероксидов и сульфидов рения, а данные о перренатах $\text{CuReO}_4, \text{Ca}(\text{ReO}_4)_2$ и других соединениях отсутствуют. Базу данных программного комплекса дополнили рассчитанными ранее свойствами перренатов металлов [20].

В расчетах также учитывали тот факт, что нам неизвестно, как взаимодействуют проба концентрата, смешанная с добавкой, с окружающей атмосферой. Поэтому мы меняли степень взаимодействия компонентов с кислородом воздуха, варьируя мольное соотношение: проба/воздух. Сопоставляя результаты моделирования, нашли оптимальное мольное соотношение: молибденовый концентрат + $\text{Ca}(\text{OH})_2$: воздух = 1:5. Таким образом, термодинамические расчеты проведены в диапазоне температур $100\text{--}800^\circ\text{C}$, с шагом 100°C , при давлении системы 0.1 МПа в атмосфере воздуха (мольное соотношение: молибденовый концентрат + $\text{Ca}(\text{OH})_2$: воздух = 1:5).

Для корректности расчетов применяли принцип последовательных термодинамических преобразований в открытой термодинамиче-

ской системе: если, согласно расчетам, при повышении температуры происходят потери части компонентов в газовую фазу, то на последующих температурных точках расчета, соответственно, им корректируются качественные и количественные исходные химические составы системы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Поскольку молибденовый концентрат в основном состоит из дисульфида молибдена, а рений присутствует в виде дисульфида рения – рассмотрены следующие предполагаемые реакции окисления дисульфида молибдена и дисульфида рения [1, 17]:

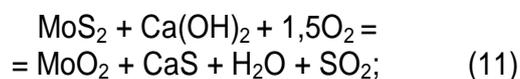
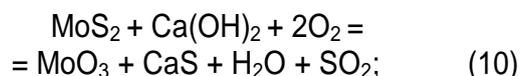
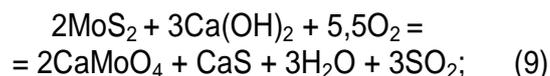
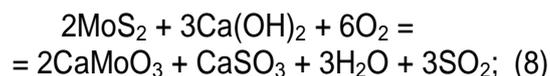
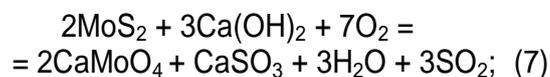
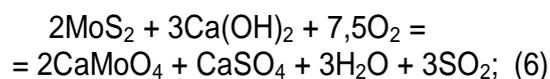
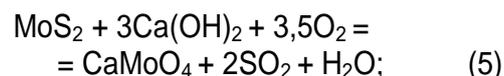
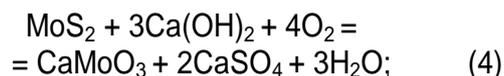
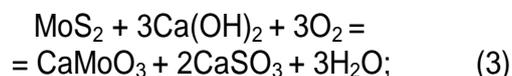
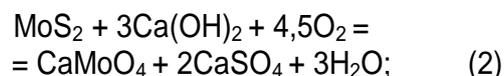
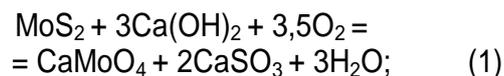
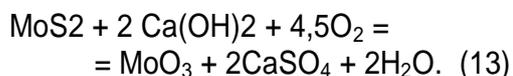
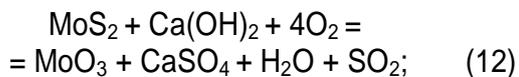
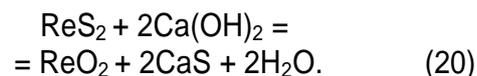
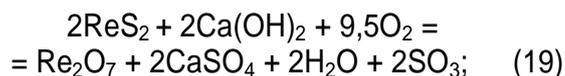
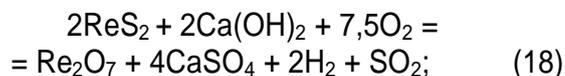
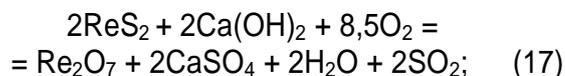
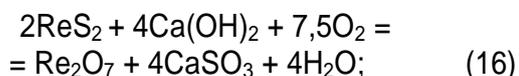
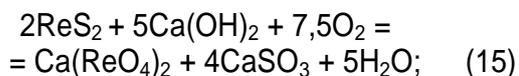
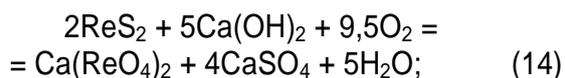


Таблица 1. Химический состав молибденового концентрата с Южно-Шамейского месторождения (в % по массе)
Table 1. Chemical composition of molybdenum concentrate from the Yuzhno-Shameyskoye deposit (% w/w)

Элемент	Mo	S	Al	Ca	Cu	Fe	O	Si	Na	Ti	P	Re	K	Mg	Pb
масс. %	37	35,4	0,65	0,332	2,03	5	13,3	4,36	0,23	0,032	0,036	0,0049	0,75	0,72	0,154



Предполагаемые реакции окисления дисульфида рения:



В табл. 2 приведены результаты по изменению свободной энергии Гиббса (ΔG_t) при различных температурах для окислительных реакций с дисульфидом молибдена и рения.

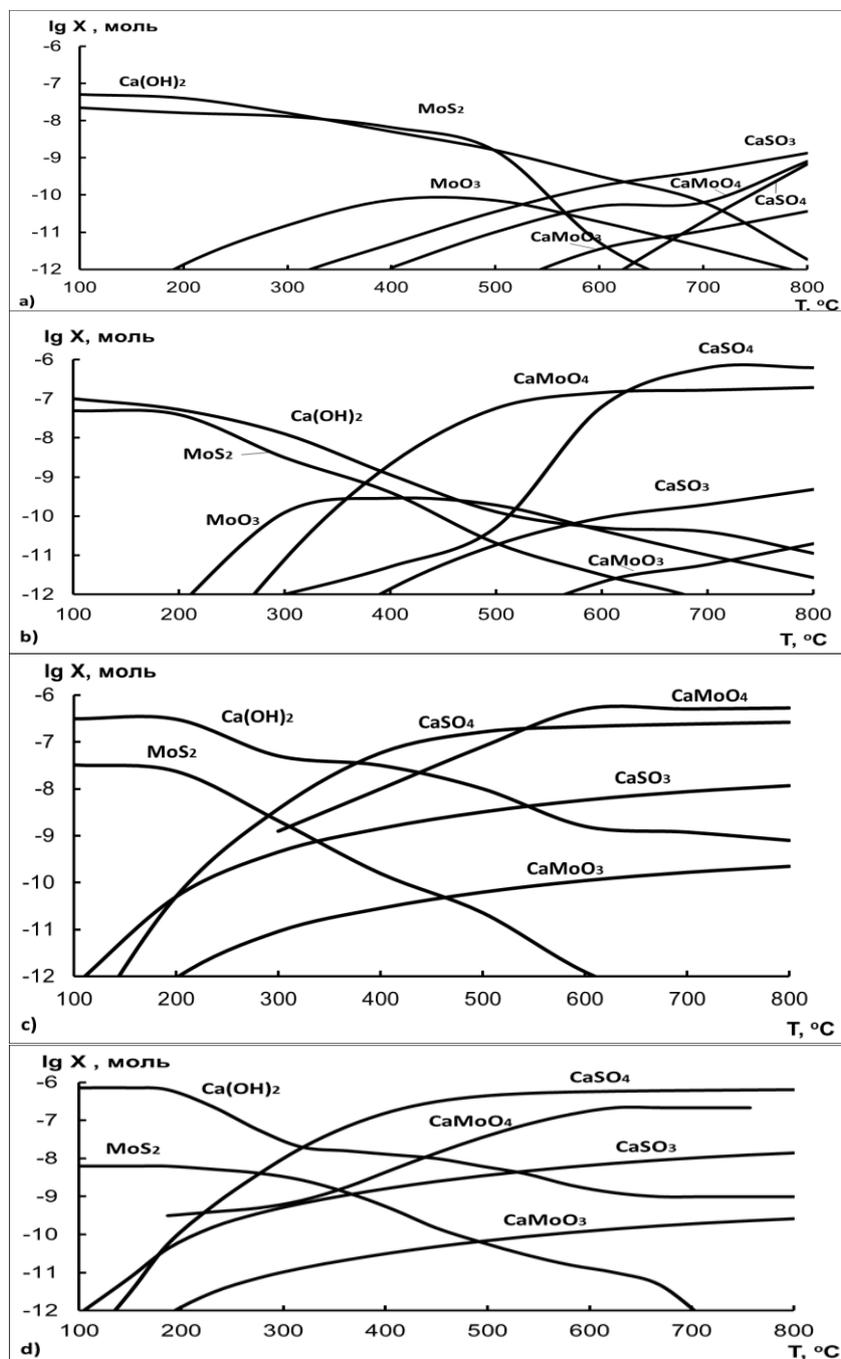
Таблица 2. Изменение свободной энергии Гиббса (ΔG_t , кДж/моль) для реакций дисульфидом молибдена с $\text{Ca}(\text{OH})_2$ при различных температурах обжига (T , °C)

Table 2. Variations of Gibbs free energy (ΔG_t , kJ/mol) in molybdenum disulfide and $\text{Ca}(\text{OH})_2$ reactions at different roasting temperatures (T , °C)

ΔG_t , кДж/моль								
N_{e} \ T, °C	100	200	300	400	500	600	700	800
1	-1301.38	-1286.3	-1270.3	-1253.8	-1236.6	-1218.9	-1200.9	-1178.2
2	-1785.5	-1751	-1716	-1680	-1645	-1609	-1573.2	-1532
3	-1050	-1041.7	-1032.5	-1022.4	-1011.6	-1000	-988	-971.7
4	-1534.2	-1506.4	-1478.1	-1449.2	-1420	-1390.5	-1360.7	-1326.4
5	-1095.2	-1088.8	-1082.2	-1075.3	-1068.2	-1061	-1053.6	-1044.8
6	-2535.6	-2508.8	-2481.3	-2453.2	-2424.8	-2396.1	-2367.1	-2333.6
7	-2293.5	-2276.4	-2258.5	-2239.8	-2220.6	-2201	-2181	-2156.3
8	-1790.8	-1787.4	-1782.7	-1777	-1770.6	-1763.5	-1755.9	-1743.4
9	-1705	-1714.2	-1722.4	-1729.8	-1736.5	-1742.7	-1748.3	-1749
10	-500.1	-501	-501.6	-501.9	-502	-501.9	-501.4	-501.2
11	-369.9	-377.9	-385.5	-392.7	-399.7	-406.3	-412.8	-417.6
12	-1330.7	-1295.7	-1260.5	-1225.4	-1190.3	-1155.4	-1120.5	-1084.4
13	-1675.9	-1626.7	-1577.4	-1528.1	-1478.7	-1429.5	-1380.39	-1328.5
14	-3661.9	-3505.8	-3351.1	-3198	-3046.6	-2896.76	-2748.50	-2601.85
15	-2694.26	-2576.97	-2460.51	-2344.93	-2230.3	-2116.745	-2004.29	-1893.04
16	-2267.8	-2224.6	-2180.1	-2134.5	-2088.1	-2041	-1993.3	-1939.3
17	-2545.8	-2491.9	-2437.5	-2382.9	-2328.1	-2273.3	-2218.4	-2160.6
18	-2095.2	-2050.9	-2006.4	-1962.1	-1917.8	-1873.7	-1829.7	-1782.9
19	-2673.6	-2600.7	-2527.4	-2453.9	-2380.4	-2306.9	-2233.4	-2157.1
20	625.2	571.5	518.8	467	416.2	366.3	317.1	271.7

Из данных табл. 2 видно, что равновесие большинства реакций, кроме реакции 20, смещено вправо. Исходя из значений ΔG° , наиболее вероятные реакции окисления дисульфида молибдена 6 и 7, представленные

системами $2\text{MoS}_2-3\text{Ca}(\text{OH})_2-7,5\text{O}_2$ и $2\text{MoS}_2-3\text{Ca}(\text{OH})_2-7\text{O}_2$. Соответственно, предполагаемой основной реакцией окисления дисульфида рения является реакция 14, представленная системой: $2\text{ReS}_2-5\text{Ca}(\text{OH})_2-9,5\text{O}_2$.



Рассчитанные зависимости логарифма равновесного количества индивидуальных веществ, содержащих молибден и серу (моль), от температуры T обжига при массовом соотношении:

$M_k : \text{Ca}(\text{OH})_2$: a – 1:0.8; b – 1:1; c – 1:1.2; d – 1:1.5

Calculated dependences of the logarithm of equilibrium amount of individual substances containing molybdenum and sulfur (mol) on the roasting temperature T at the mass ratio: $M_k : \text{Ca}(\text{OH})_2$: a – 1:0.8; b – 1:1; c – 1:1.2; d – 1:1.5

Интересны к рассмотрению реакции 1, 2, представленные соответствующими системами: $\text{MoS}_2\text{-3Ca(OH)}_2\text{-3,5O}_2$, $\text{MoS}_2\text{-3Ca(OH)}_2\text{-4,5O}_2$. Они имеют близкие значения ΔG и вероятность их протекания следует за реакцией 6. Подобная ситуация обстоит и с системами: $2\text{ReS}_2\text{-5Ca(OH)}_2\text{-7,5O}_2$; $2\text{ReS}_2\text{-4Ca(OH)}_2\text{-7,5O}_2$; $2\text{ReS}_2\text{-2Ca(OH)}_2\text{-8,5O}_2$ (реакции 15, 16, 17).

вышает 10 мг/м^3 . Основная часть серы при обжиге находится в виде CaSO_4 и CaSO_3 , молибден – в виде MoO_3 , CaMoO_4 и CaMoO_3 . Фазовые состояния веществ образованы по следующим реакциям процесса обжига молибденового концентрата: 6, 7, 13, 15, 16. Оптимальной температурой обжига с гидроксидом кальция можно считать 600°C .

Таблица 3. Содержание газообразных веществ от температуры в системах при различном соотношении: Mk:Ca(OH)_2
Table 3. Content of gaseous substances versus temperature in systems at different ratios: Mk:Ca(OH)_2

Mk : Ca(OH) ₂	T, °C Фаза, kmol	100	200	300	400	500	600	700	800
		1:0.8	SO ₂	2.69E-14	7.84E-09	2.65E-05	6.02E-03	6.87E-02	1.60E-01
	Re ₂ O ₇	1.00E-36	1.00E-36	6.55E-26	2.63E-17	8.16E-10	2.45E-08	5.52E-05	1.22E-03
1:1	SO ₂	4.53E-21	1.34E-15	8.12E-14	2.74E-10	3.54E-09	2.44E-07	8.67E-05	1.40E-02
	Re ₂ O ₇	1.00E-36	1.00E-36	1.00E-36	1.00E-36	8.56E-36	2.07E-36	1.32E-26	2.22E-11
1:1.2	SO ₂	3.33E-24	3.35E-24	9.51E-15	1.07E-13	1.66E-10	2.60E-07	2.89E-05	3.39E-04
	Re ₂ O ₇	1.00E-36	1.00E-36	1.00E-36	1.00E-36	1.56E-36	2.27E-36	3.32E-36	4.22E-21
1:1.5	SO ₂	2.69E-24	7.84E-24	2.65E-15	6.02E-13	6.87E-10	1.60E-07	1.89E-05	2.08E-04
	Re ₂ O ₇	1.00E-36	1.00E-36	1.00E-36	1.00E-36	1.40E-36	2.44E-36	2.77E-36	4.48E-28

Результаты термодинамического моделирования в виде зависимостей содержаний соединений от температуры приведены на рисунке.

В табл. 3 показано влияние температуры на процесс образования основных газообразных продуктов при различном массовом соотношении: Mk : Ca(OH)_2 .

Согласно полученным данным (см. рис. 1, табл. 3), при обжиге концентрата с гидроксидом кальция, незначительные потери рения в виде Re_2O_7 , а также серы в виде SO_2 наблюдались при массовом соотношении $\text{Mk : Ca(OH)}_2 = 1:0.8$ и температуре обжига выше 700°C . Концентрация $\text{SO}_{2(g)}$ при соотношении $\text{Mk : Ca(OH)}_2 \geq 1:1$ до 600°C не пре-

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе рассчитанных термодинамических данных выполнено моделирование процесса обжига молибденового концентрата с гидроксидом кальция. Установлено оптимальное соотношение, необходимое для успешного протекания процесса: $\text{Mk к Ca(OH)}_2 = 1:1$ по массе. Термодинамическое моделирование показало, что в интервале температур $100\text{--}600^\circ\text{C}$ при использовании Ca(OH)_2 не происходит потерь рения и молибдена, наблюдается незначительное выделение серы. Результаты расчетов согласуются с экспериментальными данными, что говорит о достоверности термодинамического моделирования.

Список источников

1. Зеликман А. Н. Молибден. М.: Изд-во «Металлургия», 1970. 441 с.
2. Shi Lihua, Wang Xue-Wen, Wang Ming-Yu, Peng Jun, Xiao Caixia. Extraction of molybdenum from high-impurity ferromolybdenum by roasting with Na_2CO_3 and CaO and leaching with water // Hydrometallurgy. 2011. Vol. 108. Iss. 3-4. P. 214–219. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.04.009>.
3. Lianyong Wang, Wenqiang Sun, Jingfan Zhang, Jiuju

- Cai. A novel self-heated roasting technology for molybdenum concentrate // Rare Metal Materials and Engineering. 2015. Vol. 44. Iss. 11. P. 2618–2622. [https://doi.org/10.1016/S1875-5372\(16\)60005-X](https://doi.org/10.1016/S1875-5372(16)60005-X).
4. Fan Xiao-hui, Deng Qiong, Gan Min, Chen Xu-ling. Roasting oxidation behaviors of ReS_2 and MoS_2 in powdery rhenium-bearing, low-grade molybdenum concentrate // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2019. Vol. 29. Iss. 4. P. 840–848.

[https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(19\)64994-0](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(19)64994-0).

5. Wang Xue-Wen, Peng Jun, Wang Ming-Yu, Ye Pu-Hong, Xiao Yuan. The role of CaO in the extraction of Ni and Mo from carbonaceous shale by calcification roasting, sulphation roasting and water leaching // *International Journal of Mineral Processing*. 2011. Vol. 100. Iss. 3-4. P. 130–135. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2011.05.012>.

6. Wang Lu, Zhang Guo-hua, Dang Jie, Chou Kuo-chih. Oxidation roasting of molybdenite concentrate // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2015. Vol. 25. Iss. 12. P. 4167–4174. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(15\)64067-5](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(15)64067-5).

7. Zhou Qiu-sheng, Yun Wei-tao, Xi Jun-tao, Li Xiao-bin, Qi Tian-gui, Liu Gui-hua. Molybdenite–limestone oxidizing roasting followed by calcine leaching with ammonium carbonate solution // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2017. Vol. 27. Iss. 7. P. 1618–1626. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(17\)60184-5](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(17)60184-5).

8. Sun Hu, Li Guanghui, Yu Junjie, Luo Jun, Rao Mingjun, Peng Zhiwei, et al. A novel simultaneous oxidizing-volatilizing process for efficient separation of pure MoO₃ from structure self-sustained molybdenite concentrate pellets // *Powder Technology*. 2019. Vol. 345. P. 338–345. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.01.021>.

9. Fu Yun-feng, Xiao Qing-gui, Gao Yi-ying, Ning Pengge, Xu Hong-bin, Zhang Yi. Pressure aqueous oxidation of molybdenite concentrate with oxygen // *Hydrometallurgy*. 2017. Vol. 174. P. 131–139. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2017.10.001>.

10. Fan Xiao-hui, Deng Qiong, Gan Min, Chen Xu-ling. Roasting oxidation behaviors of ReS₂ and MoS₂ in powdery rhenium-bearing, low-grade molybdenum concentrate // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2019. Vol. 29. Iss. 4. P. 840–848. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(19\)64994-0](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(19)64994-0).

11. Li Xiao-bin, Wu Tao, Zhou Qiu-sheng, Qi Tian-gui, Peng Zhi-hong, Liu Gui-hua. Kinetics of oxidation roasting of molybdenite with different particle sizes // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2021. Vol. 31. Iss. 3. P. 842–852. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(21\)65543-7](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(21)65543-7).

12. Zhou Qiu-sheng, Yun Wei-tao, Xi Jun-tao, Li Xiao-bin, Qi Tian-gui, Liu Gui-hua, et al. Molybdenite–limestone oxidizing roasting followed by calcine leaching with ammonium carbonate solution // *Transactions of Nonferrous*

Metals Society of China. 2017. Vol. 27. Iss. 7. P. 1618–1626. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(17\)60184-5](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(17)60184-5).

13. Fan Xiao-hui, Deng Qiong, Gan Min, Chen Xu-ling. Roasting oxidation behaviors of ReS₂ and MoS₂ in powdery rhenium-bearing, low-grade molybdenum concentrate // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2019. Vol. 29. Iss. 4. P. 840–848. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(19\)64994-0](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(19)64994-0).

14. Li Xiao-bin, Wu Tao, Zhou Qiu-sheng, Qi Tian-gui, Peng Zhi-hong, Liu Gui-hua. Kinetics of oxidation roasting of molybdenite with different particle sizes // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2021. Vol. 31. Iss. 3. P. 842–852. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(21\)65543-7](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(21)65543-7).

15. Харин Е. И., Халезов Б. Д., Зеленин Е. А. Разработка экологически чистой комплексной технологии переработки молибденового концентрата Южно-Шамейского месторождения // *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2015. № 5. С. 129–134.

16. Ватолин Н. А., Халезов Б. Д., Харин Е. И., Зеленин Е. А. Поиск экологически чистой технологии переработки молибденовых концентратов // *Химическая технология*. 2012. Т. 13. № 4. С. 229–232.

17. Киреев В. А. Методы практических расчетов в термодинамике химических реакций. М.: Изд-во «Химия», 1975. 536 с.

18. Ватолин Н. А., Моисеев Г. К., Трусов Б. Г. Термодинамическое моделирование в высокотемпературных неорганических системах. М.: Изд-во «Металлургия», 1994. 234 с.

19. Gan Min, Fan Xiao-hui, Chen Xu-ling, Wu Cheng-qian, Ji Zhi-yun, Wang Song-rong, et al. Reaction mechanisms of low-grade molybdenum concentrate during calcification roasting process // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2016. Vol. 26. Iss. 11. P. 3015–3023. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(16\)64432-1](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(16)64432-1).

20. Мельчакова О. В., Зайцева П. В., Майорова А. В., Куликова Т. В., Печищева Н. В., Шуняев К. Ю. Расчет термодинамических свойств перенатов металлов и их использование при моделировании подготовки проб к химическому анализу // *Аналитика и контроль*. 2019. Т. 23. № 4. С. 570–579. <https://doi.org/10.15826/analitika.2019.23.4.015>.

References

1. Zelikman A.N. *Molybdenum*. Moscow: Metallurgiya; 1970. 441 p. (In Russ.).

2. Shi Lihua, Wang Xue-Wen, Wang Ming-Yu, Peng Jun, Xiao Caixia. Extraction of molybdenum from high-impurity ferromolybdenum by roasting with Na₂CO₃ and CaO and leaching with water. *Hydrometallurgy*. 2011;108(3-4):214-219. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.04.009>.

3. Lianyong Wang, Wenqiang Sun, Jingfan Zhang, Jiujun Cai. A novel self-heated roasting technology for molybdenum concentrate. *Rare Metal Materials and Engineering*. 2015;44(11):2618-2622. [https://doi.org/10.1016/S1875-5372\(16\)60005-X](https://doi.org/10.1016/S1875-5372(16)60005-X).

4. Fan Xiao-hui, Deng Qiong, Gan Min, Chen Xu-ling. Roasting oxidation behaviors of ReS₂ and MoS₂ in powdery rhenium-bearing, low-grade molybdenum concentrate. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2019;29(4):840-848. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(19\)64994-0](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(19)64994-0).

5. Wang Xue-Wen, Peng Jun, Wang Ming-Yu, Ye Pu-Hong, Xiao Yuan. The role of CaO in the extraction of Ni and Mo from carbonaceous shale by calcification roasting, sulphation roasting and water leaching. *International Journal of Mineral Processing*. 2011;100(3-4):130-135. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2011.05.012>.

6. Wang Lu, Zhang Guo-hua, Dang Jie, Chou Kuo-chih. Oxidation roasting of molybdenite concentrate. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2015;25(12):4167-4174. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(15\)64067-5](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(15)64067-5).
7. Zhou Qiu-sheng, Yun Wei-tao, Xi Jun-tao, Li Xiao-bin, Qi Tian-gui, Liu Gui-hua. Molybdenite–limestone oxidizing roasting followed by calcine leaching with ammonium carbonate solution. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2017;27(7):1618-1626. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(17\)60184-5](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(17)60184-5).
8. Sun Hu, Li Guanghui, Yu Junjie, Luo Jun, Rao Mingjun, Peng Zhiwei, et al. A novel simultaneous oxidizing-volatilizing process for efficient separation of pure MoO₃ from structure self-sustained molybdenite concentrate pellets. *Powder Technology*. 2019;345:338-345. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.01.021>.
9. Fu Yun-feng, Xiao Qing-gui, Gao Yi-ying, Ning Pengge, Xu Hong-bin, Zhang Yi. Pressure aqueous oxidation of molybdenite concentrate with oxygen. *Hydrometallurgy*. 2017;174:131-139. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2017.10.001>.
10. Fan Xiao-hui, Deng Qiong, Gan Min, Chen Xu-ling. Roasting oxidation behaviors of ReS₂ and MoS₂ in powdery rhenium-bearing, low-grade molybdenum concentrate. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2019;29(4):840-848. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(19\)64994-0](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(19)64994-0).
11. Li Xiao-bin, Wu Tao, Zhou Qiu-sheng, Qi Tian-gui, Peng Zhi-hong, Liu Gui-hua. Kinetics of oxidation roasting of molybdenite with different particle sizes. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2021;31(3):842-852. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(21\)65543-7](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(21)65543-7).
12. Zhou Qiu-sheng, Yun Wei-tao, Xi Jun-tao, Li Xiao-bin, Qi Tian-gui, Liu Gui-hua, et al. Molybdenite–limestone oxidizing roasting followed by calcine leaching with ammonium carbonate solution. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2017;27(7):1618-1626. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(17\)60184-5](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(17)60184-5).
13. Fan Xiao-hui, Deng Qiong, Gan Min, Chen Xu-ling. Roasting oxidation behaviors of ReS₂ and MoS₂ in powdery rhenium-bearing, low-grade molybdenum concentrate. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2019;29(4):840-848. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(19\)64994-0](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(19)64994-0).
14. Li Xiao-bin, Wu Tao, Zhou Qiu-sheng, Qi Tian-gui, Peng Zhi-hong, Liu Gui-hua. Kinetics of oxidation roasting of molybdenite with different particle sizes. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2021;31(3):842-852. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(21\)65543-7](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(21)65543-7).
15. Harin E. I., Halezov B. D., Zelenin E. A. Development of an environmentally friendly integrated processing technology for molybdenum concentrate of the Yuzhno-Shameyskoye deposit. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Gornyj zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2015;5:129-134. (In Russ.).
16. Vatolin N. A., Halezov B. D., Harin E. I., Zelenin E. A. Search for environmentally friendly processing technology for molybdenum concentrates. *Himicheskaya tekhnologiya*. 2012;13(4):229-232.
17. Kireev V. A. *Practical calculation methods in the thermodynamics of chemical reactions*. Moscow: Himiya; 1975, 536 p. (In Russ.).
18. Vatolin N. A., Moiseev G. K., Trusov B. G. *Thermodynamic modeling in high-temperature inorganic systems*. Moscow: Metallurgy; 1994, 234 p. (In Russ.).
19. Gan Min, Fan Xiao-hui, Chen Xu-ling, Wu Cheng-qian, Ji Zhi-yun, Wang Song-rong, et al. Reaction mechanisms of low-grade molybdenum concentrate during calcification roasting process. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2016;26(11):3015-3023. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(16\)64432-1](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(16)64432-1).
20. Mel'chakova O. V., Zajceva P. V., Majorova A. V., Kulikova T. V., Pechishcheva N. V., Shunyaev K. Yu. Thermodynamic properties calculation of perrhenates and their application in the simulation of sample pretreatment for the chemical analysis. *Analitika i control = Analytics and Control*. 2019;23(4):570-579. <https://doi.org/10.15826/analitika.2019.23.4.015>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Алешин Дмитрий Сергеевич,

аспирант,
младший научный сотрудник,
Лаборатория гетерогенных процессов,
Институт металлургии Уральского отделения РАН,
620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 101, Россия

Крашенинин Алексей Геннадьевич,

кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник,
Лаборатория гетерогенных процессов,
Институт металлургии Уральского отделения РАН,
620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 101, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dmitriy S. Aleshin,

Postgraduate student,
Junior Researcher of the Laboratory of Heterogeneous Processes,
Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
101, Amundsen St., Yekaterinburg 620016, Russia

Aleksey G. Krashenin,

Cand. Sci. (Eng.),
Leading Researcher of the Laboratory of Heterogeneous Processes,
Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
101, Amundsen St., Yekaterinburg 620016, Russia

Зайцева Полина Владимировна,
кандидат химических наук,
старший научный сотрудник,
Лаборатория аналитической химии,
Институт металлургии Уральского отделения РАН,
620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 101, Россия

Polina V. Zaitseva,
Cand. Sci. (Chem.),
Senior Researcher of the Laboratory of Analytical
Chemistry,
Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian
Academy of Sciences,
101, Amundsen St., Yekaterinburg 620016, Russia

Танутров Игорь Николаевич,
доктор технических наук,
главный научный сотрудник,
Лаборатория гетерогенных процессов,
Институт металлургии Уральского отделения РАН,
620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 101, Россия

Igor. N. Tanutrov,
Dr. Sci. (Eng.),
Chief Researcher of the Laboratory of Heterogeneous
Processes,
Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian
Academy of Sciences,
101, Amundsen St., Yekaterinburg 620016, Russia

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 29.09.2021; одобрена после рецензирования 05.11.2021; принята к публикации 28.12.2021.

Information about the article

The article was submitted 29.09.2021; approved after reviewing 05.11.2021; accepted for publication 28.12.2021.