

Изучение Термодинамических Расчетов при Хлоридовозгонки Золотосодержащей Магнитной Фракции

¹Хамдамов М.Б., ²Нормуротов Р.И., ¹Холикулов Д.Б.

¹Алмалыкский государственный техничекий институт

²АО «Навоийский ГМК»

Аннотация. В статье приведен термодинамический анализ всевозможных реакций, происходящих при хлоридовозгоночном обжиге золотосодержащей магнитной фракции. На основании термодинамического анализа доказано необходимость проведения окислительного обжига с целью перевода железа в труднохлорируемые оксиды.

Ключевые слова: Магнитная фракция, реакция, процесс, термодинамический анализ, температура, извлечение, золото, хлор.

Study of Thermodynamic Calculations for Chloride Substance of Gold-Containing Magnetic Fraction

Abstract. This article presents a thermodynamic analysis of all possible reactions occurring during chloride-sublimation roasting of a gold-bearing magnetic fraction. Based on this thermodynamic analysis, the necessity of oxidative roasting to convert iron into difficult-to-chlorinate oxides is demonstrated.

Key words: Magnetic fraction, reaction, process, thermodynamic analysis, temperature, research, gold, chlorine.

Хлоридовозгонка является эффективным методом извлечения золота из упорной магнитной фракции (МФ), образующейся при истирании мелющих шаров. Процесс основан на образовании летучих хлоридов золота $AuCl_3$ при высоких температурах (обычно 600-900⁰C) в присутствии хлорирующих агентов ($NaCl$, $CaCl_2$), что позволяет переводить благородный металл в возгон и отделять его от основной массы железа [1].

Магнитная фракция, содержащая мелкодисперсное окисленное железо (до 75,5 %) и золото (9-15 г/т), образующаяся при магнитном обогащении. Применение окислительной или инертной атмосферы позволяет повысить степень извлечения металлов. Преимуществом процесса является, высокая степень извлечения золота из упорных, труднообогатимых цианированием продуктов, возможность одновременного извлечения серебра. Технология позволяет перерабатывать специфические отходы золотоизвлекательных фабрик, возвращая золото, потерянное при гравитации [2-4].

Хлоридовозгонка, заключается в том, что золотосодержащий продукт смешивают с хлористым натрием (или кальцием) и обжигают в окислительной атмосфере. Хлоридовозгонка предусматривает полный перевод металлического золота в летучий хлорид $AuCl$ и

последующее улавливание его из газов в виде продукта, весьма концентрированного по металлу. Такой эффект достигается лишь при высокой температуре, примерно 900-1100⁰C [5-7].

Термодинамика, позволяет установить степень устойчивости системы и принципиальную возможность осуществления в ней того или иного процесса, а также сопоставить термодинамическую вероятность протекания в системе различных реакций. Поэтому термодинамический подход имеет чрезвычайно важное значение при рассмотрении многих процессов, в частности процессов в системе твердое-газ [8-11].

В работах [12] оценены термодинамическим способом вероятность протекания химических реакций в различных металлургических процессах. Термодинамический анализ основывается на рассмотрении сравнительно ограниченного числа характеристик, влияющих на энергетическую и экономическую эффективность отдельных циклов и в целом технологических схем [13-16].

В процессе взаимодействия золота с хлором возможно протекание различных реакций [17-18]. В зависимости от температуры хлорирования участвующие в реакциях вещества находятся в различных агрегатных состояниях: золото – в кристаллическом и жидком, хлор – в газообразном, хлориды золота – в кристаллическом, жидком, газообразном состояниях. Хлор может участвовать в реакциях в молекулярной и атомарной форме.

Реакции с участием атомарного хлора могут протекать при условии диссоциации молекулярного хлора. Из величин констант равновесия системы $Cl_2 \leftrightarrow 2Cl$ (табл. 1) следует, что диссоциация молекулы хлора на атомы возможна при сравнительно высокой температуре. Для определения температуры начала диссоциации молекулярного хлора были вычислены парциальные давления молекулярного и атомарного хлора на основании величины общего давления хлора в замкнутой системе и уравнения степени диссоциации молекул хлора:

$$P_{Cl_2} = P(1 - \alpha / (1 + \alpha)) \text{ и } P_{Cl} = P(2\alpha / (1 + \alpha)).$$

Из данных табл. 1 следует, что равновесие реакции диссоциации молекулярного хлора на атомы до температуры 227⁰C настолько сдвинуто влево ($K_{227} = 2,22 \cdot 10^{-20}$), что она практически реализоваться не может. При температуре 527⁰C величина парциального давления атомарного хлора незначительна; она повышается примерно на порядок при температуре 627⁰C и еще на порядок – при 727⁰C. В соответствии с величинами парциального давления атомарного хлора участие его в реакциях хлорирования золота следует ожидать, начиная с температуры 627-727⁰C.

В соответствии с фазовым составом огарков обжига проведена термодинамическая оценка изменения свободной энергии Гиббса некоторых возможных реакций хлорирования компонентных и фазовых составляющих МФ поваренной солью при температурах 850⁰C и 1050⁰C (табл. 2).

Таблица 1.

K_p , α , P_{Cl_2} , P_{Cl} реакции диссоциации молекулярного хлора

t , ⁰ C	K_p	α	$P_{общ}$, Па·10 ³	P_{Cl_2} , Па·10 ³	P_{Cl} , Па·10 ³
----------------------	-------	----------	--------------------------------	---------------------------------	-------------------------------

25	$1,43 \cdot 10^{-37}$	$1,89 \cdot 10^{-19}$			
227	$2,22 \cdot 10^{-20}$	$7,46 \cdot 10^{-11}$	15,865		
527	$9,09 \cdot 10^{-11}$	$4,77 \cdot 10^{-6}$	101,325	101,324	0,001
627	$5,65 \cdot 10^{-9}$	$3,76 \cdot 10^{-5}$	101,325	101,317	0,008
727	$1,55 \cdot 10^{-7}$	$1,97 \cdot 10^{-4}$	101,325	101,285	0,040
827	$2,35 \cdot 10^{-6}$	$7,66 \cdot 10^{-4}$	101,325	101,169	0,156
927	$2,28 \cdot 10^{-5}$	$2,39 \cdot 10^{-3}$	101,325	100,841	0,484
1227	$3,44 \cdot 10^{-3}$	$2,93 \cdot 10^{-2}$	101,325	95,556	5,769

Таблица 2.

**Стандартные изменения свободной энергии Гиббса реакций
хлорирования компонентов МФ**

Реакция	ΔG^0 (850°C)	ΔG^0 (1050°C)
$Au_{(ТВ)} + NaCl_{(ж)} = \frac{1}{2} Au_2Cl_{2(г)} + Na_{(ТВ, ж)}$	346,9	433,6
$Ag_{(ТВ, ж)} + NaCl_{(ж)} = AgCl_{(ж)} + Na_{(ТВ, ж)}$	256,4	375,6
$Au_{(ТВ)} + \frac{1}{4} O_{2(г)} + NaCl_{(ж)} = \frac{1}{2} Au_2Cl_{2(г)} + \frac{1}{2} Na_2O_{(ТВ, ж)}$	211,3	210,0
$Ag_{(ТВ, ж)} + \frac{1}{4} O_{2(г)} + NaCl_{(ж)} = AgCl_{(ж)} + \frac{1}{2} Na_2O_{(ТВ, ж)}$	120,8	152,0
$\frac{1}{2} FeO_{(ТВ)} + NaCl_{(ж)} = FeCl_{2(ж, г)} + \frac{1}{2} Na_2O_{(ТВ, ж)}$	164,6	162,3
$\frac{1}{2} FeS_{(ТВ)} + \frac{3}{4} O_{2(г)} + NaCl_{(ж)} = \frac{1}{2} FeCl_{2(ж, г)} + \frac{1}{2} Na_2O_{(ТВ, ж)} + \frac{1}{2} SO_{2(г)}$	- 22,5	- 17,9
$Au_{(ТВ)} + \frac{1}{4} O_{2(г)} + NaCl_{(ж)} + \frac{1}{2} SiO_{2(ТВ)} = \frac{1}{2} Au_2Cl_{2(г)} + \frac{1}{2} Na_2SiO_{3(ТВ)}$	95,9	98,9
$Ag_{(ТВ, ж)} + \frac{1}{4} O_{2(г)} + NaCl_{(ж)} + \frac{1}{2} SiO_{2(ТВ)} = AgCl_{(ж)} + \frac{1}{2} Na_2SiO_{3(ТВ)}$	5,4	40,9
$\frac{1}{2} FeO_{(ТВ)} + NaCl_{(ж)} + \frac{1}{2} SiO_{2(ТВ)} = \frac{1}{2} FeCl_{2(ж, г)} + \frac{1}{2} Na_2SiO_{3(ТВ)}$	49,2	51,2

В соответствии с полученными термодинамическими данными возможность прямого хлорирования металлов является достаточно проблематичной. Создание окислительной атмосферы и присутствие диоксида кремния повышает вероятность его протекания, наличие серы стимулирует образования хлоридов железа.

Таким образом, железо намного лучше хлорируется чем его оксиды FeO и Fe₂O₃, это еще раз доказывает необходимость проведения окислительного обжига с целью перевода железа в труднхлорируемые оксиды.

На основании термодинамического анализа следует отметить, что железо намного лучше хлорируется чем FeO и Fe₂O₃, что еще раз доказывает необходимость проведения окислительного обжига с целью перевода Fe в труднохлорируемые оксиды.

Библиографический список:

1. Демин А.И., Дмитриева Е.Г. Термодинамическое моделирование процесса хлоридовозгонки цветных металлов из техногенных отходов для условий обжигowych печей. https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/147853/1/978-5-6050813-9-5_2025_016.pdf
2. Стрижко Л.С., Нормуротов Р.И., Холикулов Д.Б. Исследования по извлечению золота из золотосодержащей магнитной фракции хлорированием. Известия вузов Цветная металлургия, 2009, №4, с. 35-38. <https://doi.org/10.3103/S1067821209040075>.
3. [Санакулов К., Эргашев У.А., Хамидов Р.А. Современные способы переработки упорных золотосодержащих руд.](#) Горный вестник Узбекистана № 4 (83) 2020, с. 45-49.
4. Strizhko, L.S., Normurotov, R.I. & Kholikulov, D.B. Study of the process for gold hydrochlorination in gold-containing magnetic fraction processing. Russ. J. Non-ferrous Metals 50, 449–451 (2009). <https://doi.org/10.3103/S1067821209050046>
5. Воробьев, К. А. Переработка отходов обогащения золотосодержащих руд / К.А.Воробьев, Т.В.Чекушина // Вестник Евразийской науки. -2018 №1. <https://esj.today/PDF/18ECVN118.pdf>.
6. Воробьев А.Е., Носыров У.Ф., Ибрагимов Р.Р., Трабелсси С., Холикулов Д.Б. Выявленные наноформы золота в геогенном и техногенном минеральном сырье. Горный вестник Узбекистана, 2015, № 2, с. 18-27.
7. Якубов М.М. и др. Освобождение конвертерных шлаков в отходы в печи Ванюкова при пирометаллургическом производстве меди на АО «Алмалыкский ГМК» //Комплексное использование минерального сырья. – 2024. – Т. 331. – №. 4. – С. 60-68.
8. Кукуй Д.М., Николайчик Ю.А., Судник Л.В. Термодинамический анализ химических реакций в контактной зоне металл - противопопригарное покрытие // Литьё и металлургия. 2010. №3 (57).
9. Холикулов Д.Б. и др. Термодинамические исследования при извлечении ценных компонентов из кека цинкового производства нетрадиционным методом //Kompozitsion materiallar. Ilmiy-texnikaviy va amaliy jurnali. – 2018. – №. 1. – С. 6-8.
10. Холикулов Д.Б., Якубов М.М., Масидиков Э.М., Екубов О.М. Термодинамические исследования при извлечении ценных компонентов из кека цинкового производства нетрадиционным методом Kompozitsion materiallar. Ilmiy-texnikaviy va amaliy jurnali, 2018, № 1, с. 6-8.
11. Абдурахмонов С.А., Холикулов Д.Б., Амонов Х. Кинетика закономерности парометаллургического разложения медно-молибденового продукта. Горный вестник Узбекистана, 2002, №1, Навоий, С. 47-50.

12. Елагин А.А., Шишкин Р.А., Бекетов А.Р., Баранов М.В. Термодинамический анализ реакций при получении нитрида алюминия газофазным способом //Современные проблемы науки и образования. 2013, №2.; <https://science-education.ru/ru/article/view?id=9013>.
13. Термодинамические расчеты химико-технологических процессов: Текст лекций/ Ремизов А.Б.; Казан.гос.технол.ун-т. Казань, 2006. 140 с.
14. Нормуротов Р.И., Стрижко Л.С., Холикулов Д.Б. Исследование процесса хлоридовозгонки золота из магнитной фракции. Горный вестник Узбекистана, 2010, №3, с. 118-119.
15. Абдурахмонов С.А., Холикулов Д.Б., Курбонов Ш.К., Кутбиддинов Б.А. Механизм окисления сульфидов, входящих в состав медно-молибденового продукта, при термопарообработке. Цветная металлургия. 2003, № 2, с. 22-26.
16. Кутепов А.М. и др. Общая химическая технология: Учеб. для вузов/ А.М.Кутепов, Т.И.Бондарева, М.Г.Беренгартен. -3-е изд., перераб. -М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. -528 с.
17. Limpo I.M., Sistiga I.Mc. Хлорирующий обжиг малокомплексных руд //Revista de Metallurgia. 1965 г., т. 1, № 1, С. 5-21.
18. Зырянов М.Н, Леонов С.Б. Хлоридная металлургия золота //-М.: СП Интернет Инжиниринг. 1997 г., 288 с.
19. Lippert K.K., Dietsch H.B, Raeder A., Walden H.B. Извлечение примесей цветных металлов из Fe окатышей хлоридовозгонкой //Trans. Inst. Mining and Met. 1970 г., т. 79, №3, С. 71-84.
20. Luganov V.A. Treatment of pyrite concentrates. //XXIII International Mineral Processing Congress. Istanbul, Turkey. 2006. – Vol. 2. – P. 1360-1366.
21. Dunne, R. Challenges and opportunities in the treatment of refractory gold ores / R. Dunne // Proceedings of Gold Sessions at ALTA 2012. - Perth, 2012. -P. 1-15.
22. Масидиков Э.М. [Возможности комплексной переработки техногенных отходов медеплавильных заводов с целью минимизации энергопотерь](#) // Universum: технические науки 2025 8 (11 (140)), С 4-9.
23. Абдурахмонов С.А., Масидиков Э.М., Ахтамов Ф.Э. [Возможности комплексной переработки техногенных отходов медного производства](#) // Universum: технические науки, 2022 11-2 (104) С 40-43
24. Sovmen V.K. Biooxidation of refractory gold sulfide concentrate of Olympiada deposit / V. K. Sovmen, A.V. Belyi, M.Y. Danneker, A.A. Gish, A.N. Teleutov // Advanced Materials Research. - 2009. - V. 71-73. - P. 477480.
25. Абдурахмонов С., Холикулов Д.Б., Алматова И.У. Переработка золотосодержащих флотоконцентратов методом термопарообработки // International Journal of Advanced Technology and Natural Sciences. 2020. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/pererabotka-zolotosoderzhaschih-flotokontsentrato-v-metodom-termoparoobrabotki> (дата обращения: 19.03.2026).