

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХИМИЧЕСКИХ И ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В СИСТЕМЕ $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{--NiO--CoO--C}$

© 2017 г. А.С. Колесников, С.П. Назарбекова, К.С. Байболов, Ш.А. Джолдасова

Южно-Казахстанский государственный университет (ЮКГУ) им. М. Ауэзова, г. Шымкент, Респ. Казахстан

Статья поступила в редакцию 24.05.16 г., доработана 29.10.16 г., подписана в печать 09.11.16 г.

Проведено термодинамическое моделирование химических и фазовых превращений в системе $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{--NiO--CoO--C}$ с помощью многоцелевого программного комплекса «Астра 4», разработанного в МВТУ им. Баумана, предназначенного для моделирования равновесных состояний и процессов в высокотемпературных системах с химическими и фазовыми превращениями. Изучение моделирования химических и фазовых превращений в системе выполнялось в интервалах температур 573–1773 К и давлений 0,001–0,1 МПа. В ходе моделирования было установлено, что железо в основном переходит в $\text{Fe}_{(к)}$ и степень его перехода (α_{Fe}) составляет от 28,9 % при $T = 1173$ К до 99,05 % при $T = 1773$ К; величина α_{Ni} составляет 100 % при $T = 573\div 1273$ К и с повышением температуры до 1773 К снижается до 99,99 % (начинает переходить в газовую фазу); степень перехода кобальта (аналогично никелю он распределяется в $\text{Co}_{(к)}$) составляет 100 % при $T = 573\div 1273$ К и с увеличением температуры до 1773 К снижается до 99,99 % (начало перехода в газовую фазу).

Ключевые слова: термодинамический прогноз, химические и фазовые превращения, моделирование, оксид никеля, оксид кобальта, газовая и конденсированная фазы, металлы, восстановление, углерод, железо, никель, кобальт.

Колесников А.С. – канд. техн. наук, доцент кафедры технологий цемента, керамики и стекла ЮКГУ (160012, Казахстан, г. Шымкент, пр-т Тауке хана, 5). E-mail: kas164@rambler.ru.

Назарбекова С.П. – докт. хим. наук, профессор кафедры химии, директор департамента по академическим вопросам ЮКГУ.

Байболов К.С. – канд. техн. наук, доцент кафедры промышленного, гражданского и дорожного строительства, проректор по учебной работе и информационным технологиям ЮКГУ.

Джолдасова Ш.А. – канд. техн. наук, доцент кафедры химии ЮКГУ.

Для цитирования: Колесников А.С., Назарбекова С.П., Байболов К.С., Джолдасова Ш.А. Термодинамическое моделирование химических и фазовых превращений в системе $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{--NiO--CoO--C}$ // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2017. No. 3. С. 37–44. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2017-3-37-44.

Kolesnikov A.S., Nazarbekova S.P., Baibolov K.S., Dzholdasova Sh.A.

Thermodynamic simulation of chemical and phase transformations in the $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{--NiO--CoO--C}$ system

The paper describes the thermodynamic simulation of chemical and phase transformations in the $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{--NiO--CoO--C}$ system carried out using the Astra 4 multipurpose software package developed at the Bauman Moscow State Technical University, which was designed to simulate equilibrium states and processes in high-temperature systems with chemical and phase transformations. The study of chemical and phase transformation simulation in the system was carried out in temperature ranges of 573–1773 K and pressure ranges of 0,001–0,1 MPa. In the course of simulation it was found that iron mainly transitioned into $\text{Fe}_{(к)}$ and its transition degree (α_{Fe}) was from 28,9 % at $T = 1173$ K to 99,05 % at $T = 1773$ K; the value of α_{Ni} was 100 % at $T = 573\div 1273$ K and decreased to 99,99 % (when starting transition into the gaseous phase) when the temperature increased to 1773 K; the transition degree of cobalt (similar to nickel, it was distributed into $\text{Co}_{(к)}$) was 100 % at $T = 573\div 1273$ K and decreased to 99,99 % (when starting transition into the gaseous phase) when the temperature increased to 1773 K.

Keywords: thermodynamic prediction, chemical and phase transformations, simulation, nickel oxide, cobalt oxide, gaseous and condensed phases, metals, recovery, carbon, iron, nickel, cobalt.

Kolesnikov A.S. – Cand. Sci. (Tech.), associate prof. of the Department «Technology of cement, ceramics and glass» of the South Kazakhstan State University n.a. M. Auezov (SKSU) (160012, Kazakhstan, Shymkent, Tauke Khan avenue, 5). E-mail: kas164@rambler.ru.

Nazarbekova S.P. – Dr. Sci. (Chem.), prof. of the Department of chemistry, director of the Department of academic affairs, SKSU.

Baibolov K.S. – Cand. Sci. (Tech.), associate prof. of the Department «Industrial, civil and road construction», prorector for academic affairs and information technology, SKSU.

Dzholdasova Sh.A. – Cand. Sci. (Tech.), associate prof. of the Department of chemistry, SKSU.

Citation: Kolesnikov A.S., Nazarbekova S.P., Baibolov K.S., Dzholdasova Sh.A. Termodinamicheskoe modelirovanie khimicheskikh i fazovykh prevrashchenii v sisteme $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{--NiO--CoO--C}$. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2017. No. 3. P. 37–44. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2017-3-37-44.

Введение

Известно, что никель относится к группе базовых цветных металлов. Его производство основано на переработке сульфидных медно-никелевых руд и оксидно-силикатного никель-кобальтового рудного сырья. Производство никеля очень сильно зависит от основных компонентов добываемых руд (золота, меди, металлов платиновой группы) и рынков этих металлов [1].

Значительной особенностью рынка никеля является высокая доля использования его в качестве добавок в специальные жаропрочные и коррозионно-стойкие сплавы и нержавеющие стали, которые применяются в различных отраслях промышленности, на транспорте и в бытовой технике. Потребление первичного никеля в отраслях по состоянию на 2013 г., согласно данным информационного агентства «Bloomberg», представлено на рис. 1, а сталелитейными заводами — на рис. 2.

На начало 2014 г., по данным геологической службы США, общие запасы никеля в мире оценивались в 130 млн т (за последнее десятилетие величина этого показателя пересматривалась специалистами этой организации несколько раз), а его подтвержденные мировые запасы состав-

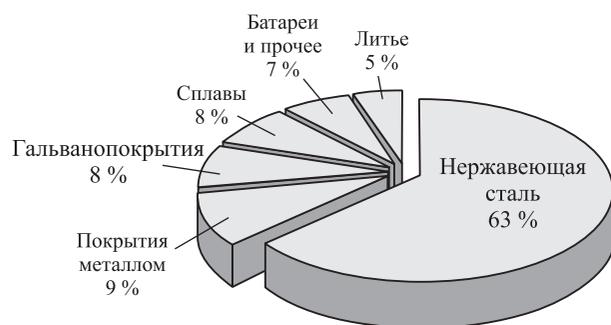


Рис. 1. Потребление первичного никеля в разрезе отраслей



Рис. 2. Потребление первичного никеля по видам сталелитейными заводами

ляли 74 млн т. Крупнейшими подтвержденными запасами никеля на настоящий момент обладают такие страны, как Австралия, Новая Каледония, Бразилия и Россия. Значительные запасы принадлежат также Кубе, Индонезии, ЮАР, Канаде и Китаю [1–5].

Минерально-сырьевая база мировой никелевой промышленности в своей основе представлена месторождениями двух типов: сульфидными медно-никелевыми и оксидно-силикатными кобальт-никелевыми. На остальные месторождения, из которых никель извлекается попутно, приходится 0,1–0,2 % запасов металла [1, 5].

В мире около 60 % запасов никеля сосредоточено в оксидных месторождениях никелевых руд, но только всего 40 % металла извлекают из латеритных руд (на начало 2014 г.). Это обуславливается тем, что в сульфидных рудах, помимо богатого содержания в них Ni и Cu, присутствуют также редкие и благородные металлы, которые при попутном извлечении дают значительный доход производителю, в отличие от целевого никеля. Необходимо отметить, что сульфидные руды имеются в Канаде, Китае, России и ЮАР, а также составляют 50 % месторождений никелевой руды Австралии. Минерально-сырьевая база Кубы, Индонезии, Новой Каледонии, Казахстана и других стран состоит из оксидно-силикатных месторождений никелевых руд [1, 6].

В Республике Казахстан сосредоточены значительные запасы оксидно-никелевых руд, и имеются сведения о проведении разведки на >44 месторождениях никелевых руд, которые представляют промышленный интерес. В разведанных рудах содержание никеля в среднем составляет ~0,65±±1,35 %, а в отдельных участках — до 1,4±3,0 % [2].

В настоящий момент в процессе разработки находится ряд месторождений Кимперсайского рудного района: Тайкеткенское, Батамшинское, Ново-Бурановское, Промежуточное, Ново-Батамшинское, Чугаевское и Октябрьское. Кдобыче представлены месторождения Рождественское, Щербакновское, Бурановское, Ново-Саздыкское, Каменный Кобчик и Старо-Тайкетенское. В разрабатываемых и представленных к добыче никельсодержащих рудах содержатся в основном оксиды металлов в виде Fe₂O₃, NiO и CoO.

Необходимо отметить, что в мировой практике, как правило, перерабатывают никелевую руду, содержащую >1,4 % Ni, однако заметно внимание и к более бедным никелевым рудам [2].

Руды, которые добывали в месторождениях Казахстана, до 2007 г. перерабатывали в России: на комбинате «Южуралникель» (г. Орск), в ООО «Буруктальский металлургический завод» (Оренбургская обл.) и, частично, в ОАО «Уфалейникель» (Челябинская обл.). Организация собственных промышленных производств никеля в Казахстане из имеющихся в значительных количествах месторождений никелевых руд однозначно является актуальной.

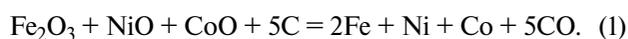
Проведение исследований термодинамического моделирования химических и фазовых превращений в условиях системы $Fe_2O_3-NiO-CoO-C$ при помощи комплексной программы «Астра-4» представляет научную новизну и экономическую значимость для промышленности Республики Казахстан.

Целью работы являлась оценка влияния температуры и давления при термодинамическом моделировании восстановительной электроплавки [7–

12] на фазовые превращения в условиях системы $Fe_2O_3-NiO-CoO-C$ с извлечением Ni, Co и Fe.

Методика исследований

Для исследования возможности восстановления металлов в системе $Fe_2O_3-NiO-CoO-C$ было использовано программное приложение «HSC Chemistry 5», разработанное компанией «Outokumpu» (Финляндия) [13] и предназначенное для расчета термодинамических функций (теплоемкости (C_m), энтальпии (ΔH), энтропии (ΔS), энергии Гиббса (ΔG)) индивидуального вещества либо их изменения в ходе химической реакции. Был выполнен расчет изменения энергии Гиббса реакции, взятой за базовую:



Результаты расчета приведены в табл. 1.

На основании полученных значений ΔG для ис-

Таблица 1
Расчет энергии Гиббса реакции (1)

T, K	$\Delta H, \text{кДж/моль}$	$\Delta S, \text{кДж/К}$	$\Delta G, \text{кДж/моль}$	Константа равновесия (K)	$\lg K$
573	738,685	875,730	236,892	$2,53 \cdot 10^{-22}$	-21,597
673	733,720	867,750	149,725	$2,38 \cdot 10^{-12}$	-11,622
773	728,210	860,148	63,315	$5,26 \cdot 10^{-5}$	-4,279
873	721,967	852,556	-22,314	$2,16 \cdot 10^1$	1,335
973	715,842	845,897	-107,216	$5,70 \cdot 10^5$	5,756
1073	713,827	843,923	-191,702	$2,15 \cdot 10^9$	9,333
1173	710,464	840,932	-275,949	$1,94 \cdot 10^{12}$	12,289
1273	707,504	838,566	-359,990	$5,92 \cdot 10^{14}$	14,773
1373	702,912	835,090	-443,666	$7,59 \cdot 10^{16}$	16,880
1473	697,720	831,447	-527,001	$4,89 \cdot 10^{18}$	18,690
1573	691,987	827,681	-609,956	$1,80 \cdot 10^{20}$	20,257
1673	687,890	825,095	-692,494	$4,19 \cdot 10^{21}$	21,623
1773	716,339	841,333	-775,345	$6,99 \cdot 10^{22}$	22,844

Вещество	Масса, г/моль	Концентрация, %	Кол-во		Объем, мл
			моль	г	
Fe_2O_3	159,692	43,233	1	159,692	30,476
NiO	74,699	20,223	1	74,699	11,116
CoO	74,933	20,286	1	74,933	11,617
C	12,011	16,258	5	60,055	22,922
Fe	55,847	30,238	2	111,694	14,21
Ni	58,7	15,892	1	58,7	6,596
Co	58,933	15,955	1	58,933	6,652
$CO_{(г)}$	28,01	37,916	5	140,052	112,068

следуемой реакции было проведено термодинамическое моделирование при помощи комплексной программы «Астра-4» по восстановлению металлов в условиях системы $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{—NiO—CoO—C}$ в интервалах давлений 0,001—0,1 МПа и температур 573—1773 К.

Алгоритм многоцелевого программного комплекса «Астра-4» построен на универсальном термодинамическом методе определения характеристик равновесия гетерогенных систем на основе фундаментального принципа максимума энтропии. Благодаря простоте постановки задачи моделирования программный комплекс «Астра» позволяет применять термодинамический метод для изучения большего числа самых разнообразных высокотемпературных состояний и процессов [14, 15].

Расчеты состава фаз и характеристик равновесия проводятся с использованием справочной базы данных индивидуальных веществ, в которой основу информации составляют их термодинамические, теплофизические и термохимические свойства, систематизированные в Институте высоких температур АН СССР, национальном бюро стандартов США, опубликованные в периодической печати, монографиях и справочниках, а также обработанные и рассчитанные в МГТУ им. Н.Э. Баумана [14, 15].

Результаты и их обсуждение

Согласно проведенным расчетам, представленным в табл. 1, начало протекания реакции на-

блюдается уже при температуре 873 К, когда $\Delta G = -22,314$ кДж/моль, при последующем увеличении температуры энергия Гиббса реакции становится все более отрицательной, достигая $-775,345$ кДж/моль при $T = 1773$ К.

Степень перехода железа (α_{Fe}) в условиях системы $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{—NiO—CoO—C}$, в зависимости от давления (при $P = 0,01$ и 0,001 МПа), во всем температурном интервале составляет до 99,5 % в конденсированный магнетит ($\text{Fe}_3\text{O}_{4(\text{к})}$) (рис. 3, б). При увеличении давления до 0,1 МПа железо в основном переходит в $\text{Fe}_{(\text{к})}$ и α_{Fe} изменяется от 28,9 % при $T = 1173$ К до 99,05 % при $T = 1773$ К. Для соединения $\text{Fe}_3\text{C}_{(\text{к})}$ величина α_{Fe} уменьшается от 71,02 до 0,94 % при повышении температуры от 1173 до 1773 К (см. рис. 3).

Степень перехода никеля (α_{Ni}) в $\text{Ni}_{(\text{к})}$ при давлении 0,01 и 0,001 МПа во всем температурном интервале достигает до 9 %, основная масса никеля переходит в $\text{NiO}_{(\text{к})}$ — α_{Ni} составляет до 90 % (см. рис. б). С повышением давления до 0,1 МПа степень перехода никеля в $\text{Ni}_{(\text{к})}$ равна 100 % в интервале $T = 573\text{--}1373$ К, а при увеличении температуры до 1773 К значение α_{Ni} снижается, достигая 99,99 % с началом перехода в газовую фазу (см. рис. 3).

Степень перехода углерода (α_{C}) при $T = 573\text{--}1373$ К и $P = 0,1$ МПа в системе отражает конденсированная фаза с содержанием $\text{C}_{(\text{к})}$ от 76 % при $T = 573$ К до 0 % при $T = 1173$ К и долей $\text{Fe}_3\text{C}_{(\text{к})}$, составляющей 13,3 % при $T \leq 973$ К. Газовая фаза перехода углерода представлена в виде соединений CO (от 0,01 до 99,7 % при $T = 573$ и 1773 К со-

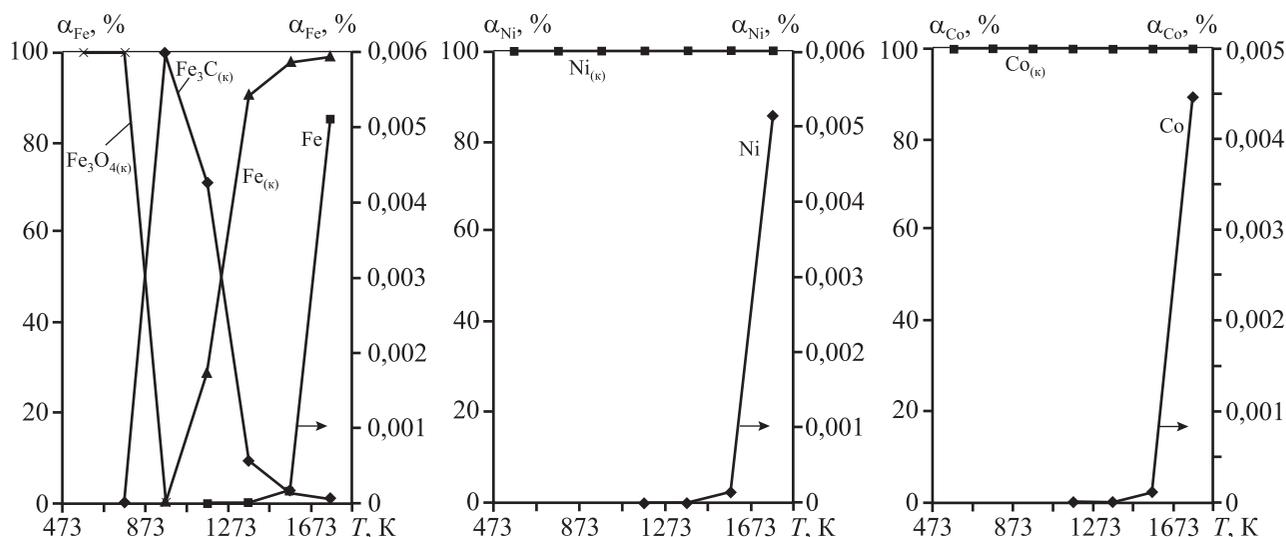


Рис. 3. Влияние температуры на степень распределения Fe, Ni, Co в условиях системы $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{—NiO—CoO—C}$ при давлении 0,1 МПа

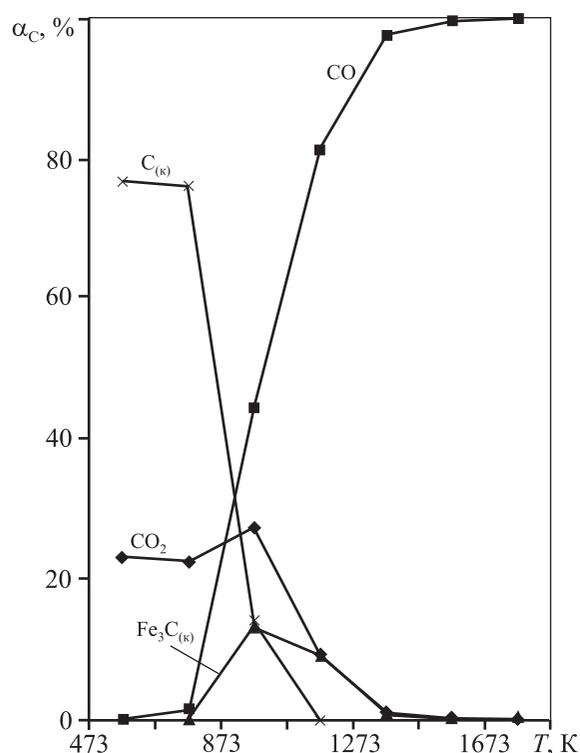


Рис. 4. Влияние температуры на степень перехода углерода в системе $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{--NiO--CoO--C}$ при давлении 0,1 МПа

ответственно) и CO_2 ($\alpha_C = 23,32\%$ при $T = 573\text{ K}$, уменьшаясь до $0,125\%$ при $T = 1773\text{ K}$) (см. рис. 4). Степень перехода углерода с уменьшением давления до интервала $0,001\text{--}0,01\text{ МПа}$ информативно приведена на рис. 5, из которого видно, что угле-

Таблица 2
Степень перехода кислорода, %, в системе $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{--NiO--CoO--C}$ при $T = 573\text{--}1773\text{ K}$ и давлении 0,1 МПа

T, K	Соединение		
	CO	CO ₂	Fe ₃ O _{4(k)}
573	0,013457	46,65329	53,33325
773	1,487957	45,17875	53,33329
973	44,70088	55,29912	0
1173	81,05912	18,94088	
1373	97,46458	2,535424	
1573	99,40930	0,590693	
1773	99,74875	0,251240	

род представлен соединениями CO_2 и CO с распределением в них соответственно $95,65\text{--}99,98\%$ и $4,32\text{--}0,048\%$ (при $P = 0,001\text{ МПа}$) и $95,66\text{--}99,99\%$ и $4,33\text{--}0,005\%$ (при $P = 0,01\text{ МПа}$).

Картина распределения кобальта в условиях системы $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{--NiO--CoO--C}$ показана на рис. 3 и 6. Видно, что в интервале давлений $0,001\text{--}0,01\text{ МПа}$ он на $99,9\%$ представлен соединением $\text{CoO}_{(k)}$ (см. рис. 6), а с увеличением давления до $0,1\text{ МПа}$ (см. рис. 3) — распределяется в $\text{Co}(k)$, причем в интервале $T = 600\text{--}1300\text{ K}$ степень перехода кобальта достигает 100% , а при дальнейшем увеличении температуры до 1773 K она снижается до $99,99\%$ с началом перехода в газовую фазу, подобно поведению Ni (см. рис. 3).

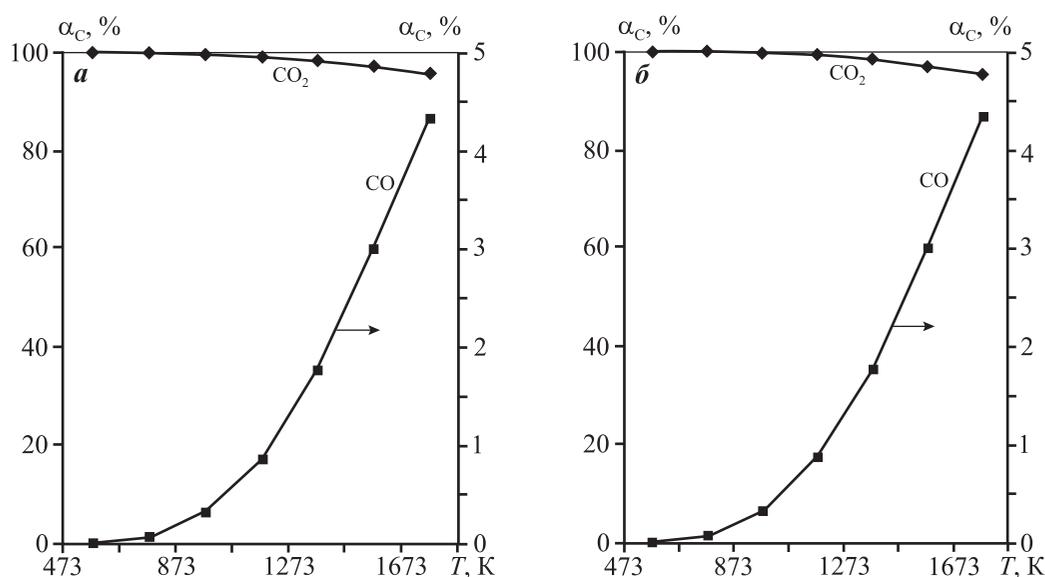


Рис. 5. Влияние температуры на степень перехода углерода в условиях системы $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{--NiO--CoO--C}$ при $P = 0,01\text{ МПа}$ (а) и $0,001\text{ МПа}$ (б)

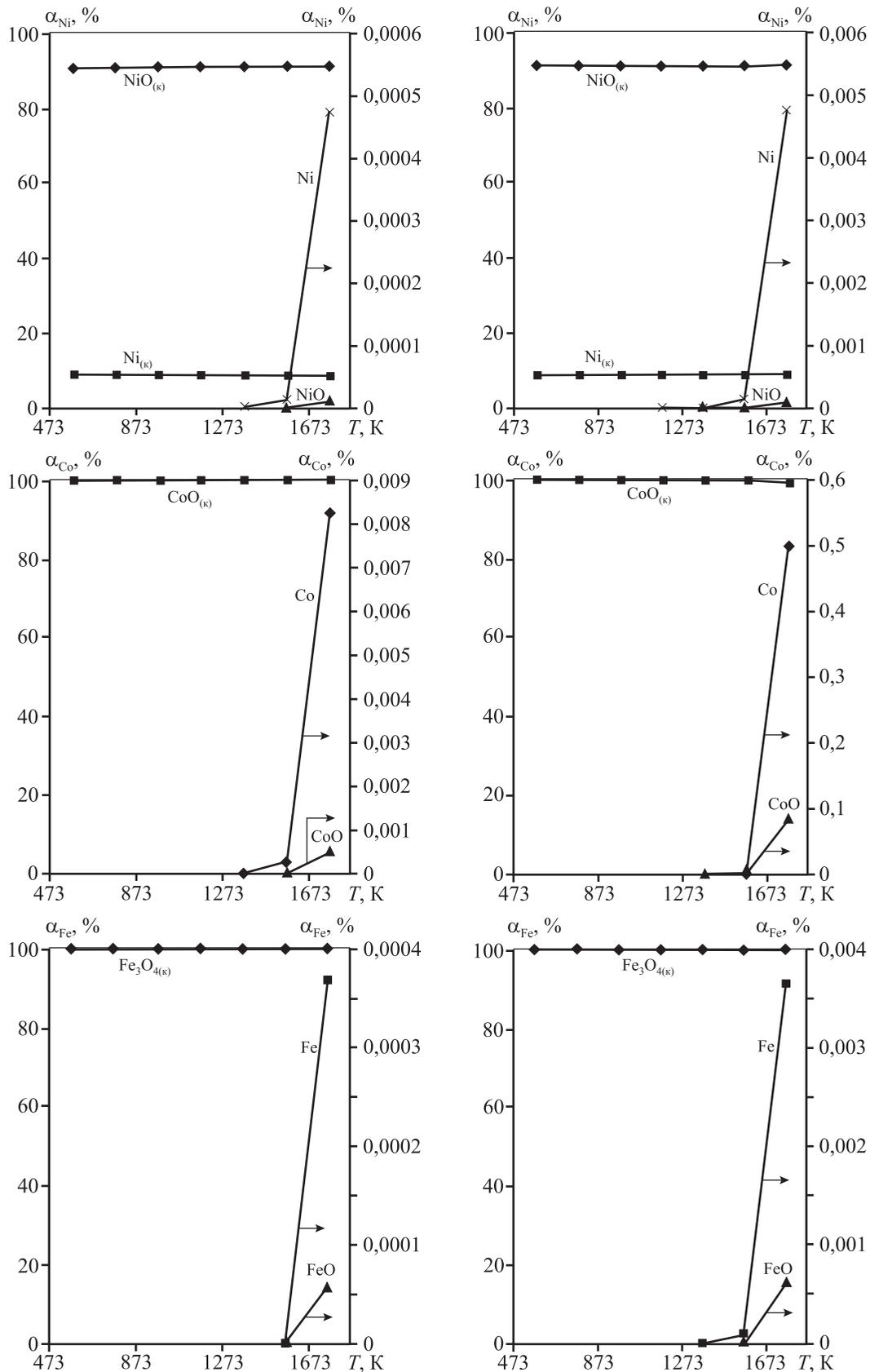
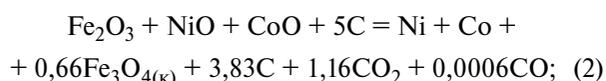


Рис. 6. Влияние температуры на степень перехода Ni, Co и Fe в условиях системы Fe₂O₃-NiO-CoO-C P = 0,01 МПа (слева) и 0,001 МПа (справа)

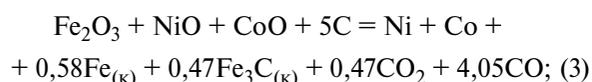
Кислород в рассматриваемой системе при $P = 0,1$ МПа переходит в $\text{Fe}_3\text{O}_{4(\text{к})}$ до 53,33 % в температурном интервале 573—773 К, в CO_2 до 46,65 % при $T = 573$ К с уменьшением до 0,25 % при $T = 1773$ К и в CO , составляя 0,013—99,75 % при $T = 573$ ÷1773 К (табл. 2).

На основании проведенного термодинамического исследования в системе Fe_2O_3 — NiO — CoO — C получены следующие химические уравнения при температурах 573, 1173 и 1773 К:

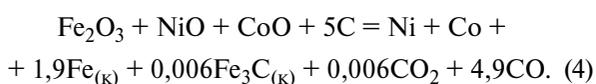
$T = 573$ К:



$T = 1173$ К:



$T = 1773$ К:



Заключение

По результатам термодинамического моделирования системы Fe_2O_3 — NiO — CoO — C в температурном интервале 573—1773 К и диапазоне давлений 0,001—0,1 МПа вытекают следующие выводы:

— оптимальный температурный интервал совместного восстановления железа, никеля и кобальта составляет 1373—1773 К при давлении 0,1 МПа, который характеризуется степенью перехода железа 90,49—99,05 %, никеля 99,994—99,9999 % и кобальта 99,995—99,9999 %;

— проведенные термодинамические расчеты совместного восстановления металлов из вышеприведенной системы подтверждают возможность получения ферросплава в виде ферроникеля.

Литература

1. Резник И.Д., Ермаков Г.П., Шнейерсон Я.М. Никель. В 3 т. М.: Наука и технология, 2001.
2. Борбат В.Ф., Лещ И.Ю. Новые процессы в металлургии никеля и кобальта. М.: Металлургия, 1976.
3. Alibhai K.A.K., Dudney A.W.L., Leak D.J., Agatzini S., Tzeferis P. Bioleaching and bioprecipitation of nickel and iron from laterites / FEMS Microbiol. Rev. 1993. Vol. 1—3. P. 87—96.
4. Sukla L.B., Panchanadikar V.V., Kar R.N. Regional Research Laboratory, Bhubaneswar 751013, Orissa, India // World J. Microbiol. Biotechnol. 1993. Vol. 9. No. 2. P. 255—257.
5. Живаева А.Б., Башлыкова Т.В., Дорошенко М.В., Горшков Г.В., Горшкова Т.И., Свиридов Л.И. Бактериальное выщелачивание силикатных никелевых руд // Цвет. металлы. 2007. No. 3. С. 65—67.
6. Seggiana M., Vitoloa S., D'Antoneb S. Recovery of nickel from Orimulsion fly ash by iminodiacetic acid chelating resin // Hydrometallurgy. Vol. 81. No. 1. 2006. P. 9—14.
7. Mohapatra S., Sengupta Ch., Nayak B.D., Sukla L.B., Mishra B.K. Effect of thermal pretreatment on recovery of nickel and cobalt from Sukinda lateritic nickel ore using microorganisms // Korean J. Chem. Eng. 2008. Vol. 25. P. 1070—1075.
8. Zhou Sh., Wei Y., Li B., Wang H., Ma B., Wang Ch. Chloridization and reduction roasting of high-magnesium low-nickel oxide ore followed by magnetic separation to enrich ferronickel concentrate // Metall. Mater. Trans. B. 2016. Vol. 47. P. 145—153.
9. Kim K.D., Huh W.W., Min D.J. Effect of FeO and CaO on the sulfide capacity of the ferronickel smelting slag // Metall. Mater. Trans. B. 2014. Vol. 45. P. 889—896.
10. Колесников А.С., Капсалямов Б.А., Колесникова О.Г., Кураев Р.М., Стрюковский И.А. Технология переработки отходов цинковой промышленности с получением ферросплава и возгонов цветных металлов // Вестн. ЮУрГУ. 2013. No. 1. С. 34—39.
11. Kolesnikov A.S. Kinetic investigations into the distillation of nonferrous metals during complex processing of waste of metallurgical industry // Russ. J. Non-Ferr. Met. 2015. Vol. 56. No. 1. P. 1—5.
12. Колесников А.С. Термодинамическое моделирование получения ферросплава и возгонов цветных металлов в системе клинкервельцевания — углерод // Актуальные инновационные исследования: Наука и практика: Эл. науч. изд. 2013. No. 2. С. 12—17.
13. Roine A. Outokumpu HSC Chemistry for Windows. Chemical reaction and equilibrium software with extensive thermochemical database. Pori: Outokumpu Research OY, 2002.
14. Синярев Г.В., Ватолин Н.А., Моисеев Г.К. Применение ЭВМ для термодинамических расчетов металлургических процессов. М.: Наука, 1962.
15. Трусов Б.Г. Термодинамический метод анализа высокотемпературных состояний и процессов и его практическая реализация. Дис. ... докт. техн. наук. М.: МВТУ, 1984.

References

1. *Reznik I.D., Ermakov G.P., Shneerson Ya.M.* Nickel' [Nickel]. Moscow: Nauka i tekhnologiya, 2001.
2. *Borbat V.F., Leshch I.Yu.* Novye protsessy v metallurgii nikelya i kobal'ta [New processes in metallurgy of nickel and cobalt]. Moscow: Metallurgiya, 1976.
3. *Alibhai K.A.K., Dudeney A.W.L., Leak D.J., Agatzini S., Tzeferis P.* Bioleaching and bioprecipitation of nickel and iron from laterites. *FEMS Microbiol. Rev.* 1993. Vol. 1—3. P. 87—96.
4. *Sukla L.B., Panchanadikar V.V., Kar R.N.* Regional Research Laboratory, Bhubaneswar 751013, Orissa, India. *World J. Microbiol. Biotechnol.* 1993. Vol. 9. No. 2. P. 255—257.
5. *Zhivayeva A.B., Bashlykova T.V., Doroshenko M.V., Gorshkov G.V., Gorshkova T.I., Sviridov L.I.* Bakterial'noye vyshchelachivanie silikatnykh nikel'nykh rud [Bacterial leaching of silicate nickel ores]. *Tsvetnye metally.* 2007. No. 3. P. 65—67.
6. *Seggiana M., Vitoloa S., D'Antoneb S.* Recovery of nickel from Orimulsion fly ash by iminodiacetic acid chelating resin. *Hydrometallurgy.* Vol. 81. No. 1. 2006. P. 9—14.
7. *Mohapatra S., Sengupta Ch., Nayak B.D., Sukla L.B., Mishra B.K.* Effect of thermal pretreatment on recovery of nickel and cobalt from Sukinda lateritic nickel ore using microorganisms. *Korean J. Chem. Eng.* 2008. Vol. 25. P. 1070—1075.
8. *Zhou Sh., Wei Y., Li B., Wang H., Ma B., Wang Ch.* Chloridization and reduction roasting of high-magnesium low-nickel oxide ore followed by magnetic separation to enrich ferronickel concentrate. *Metall. Mater. Trans. B.* 2016. Vol. 47. P. 145—153.
9. *Kim K.D., Huh W.W., Min D.J.* Effect of FeO and CaO on the sulfide capacity of the ferronickel smelting slag. *Metall. Mater. Trans. B.* 2014. Vol. 45. P. 889—896.
10. *Kolesnikov A.S., Kapsalyamov B.A., Kolesnikova O.G., Kuraev R.M., Stryukovskii I.A.* Tekhnologiya pererabotki otkhodov tsinkovoi promyshlennosti s polucheniem ferrosplava i vozgonov tsvetnykh metallov. [The technology of recycling of waste zinc industry with the obtaining of ferroalloy and sublimes non-ferrous metals]. *Vestnik YuUrGU.* 2013. No. 1. P. 34—39.
11. *Kolesnikov A.S.* Kinetic investigations into the distillation of nonferrous metals during complex processing of waste of metallurgical industry. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2015. Vol. 56. No. 1. P. 1—5.
12. *Kolesnikov A.S.* Termodinamicheskoe modelirovanie polucheniya ferrosplava i vozgonov tsvetnykh metallov v sisteme klinker vel'tsevaniya — uglerod [Thermodynamic modeling of the obtaining of ferroalloy and sublimes non-ferrous metals in the system of the waelz clinker — carbon]. In: *Aktual'nye innovatsionnye issledovaniya: Nauka i praktika.* 2013. No. 2. P. 12—17.
13. *Roine A.* Outokumpu HSC Chemistry for Windows. Chemical reaction and equilibrium software with extensive thermochemical database. Pori: Outokumpu Research OY, 2002.
14. *Sinyarev G.V., Vatolin N.A., Moiseev G.K.* Primenenie EVM dlya termodinamicheskikh raschetov metallurgicheskikh protsessov [The use of computers for thermodynamic calculations of metallurgical processes]. Moscow: Nauka, 1962.
15. *Trusov B.G.* Termodinamicheskii metod analiza vysokotemperaturnykh sostoyanii i protsessov i ego prakticheskaya realizatsiya [Thermodynamic method of analysis high temperature states and processes and its practical implementation]: Dissertation of Dr. Sci. (Tech.). Moscow: MVTU, 1984.