



Оригинальная статья

УДК 669.168

DOI 10.17073/0368-0797-2021-4-273-281



ГИДРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ ОБОГАЩЕНИЕ ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ И ЖЕЛЕЗОМАРГАНЦЕВЫХ РУД

О. И. Нохрина, И. Д. Рожихина, И. А. Рыбенко,
М. А. Голодова, А. О. Израильский

■ **Сибирский государственный индустриальный университет** (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса выщелачивания полиметаллических марганецсодержащих и железомарганцевых руд. Термодинамические расчеты и экспериментальные исследования по обогащению марганецсодержащего сырья позволили определить основные технологические параметры извлечения марганца, железа и цветных металлов, разработать технологические схемы обогащения различных видов марганецсодержащего сырья. Исследования проводили для полиметаллических и железомарганцевых руд Кайгатского месторождения, месторождения Селезень, участка Сугул, расположенных на территории Кемеровской области – Кузбасса. Перед проведением лабораторных исследований был выполнен термодинамический анализ процесса выщелачивания руд, химический и рентгеноструктурный анализы проб. Лабораторные исследования проводили на многокамерной автоклавной установке МКА-4-75 с использованием в качестве растворителя хлорида кальция и хлорида железа. При введении в состав шихты восстановителя заметно улучшаются условия растворения оксидов и гидроксидов марганца при выщелачивании, поэтому была проведена серия опытов с использованием в шихте древесного угля. Выполненные термодинамические расчеты показали, что процесс выщелачивания полностью реализуем в интервале температур от 323 до 673 К. Результаты экспериментов подтвердили теоретические исследования. Полученные данные позволили предложить технологическую схему гидрометаллургического обогащения полиметаллических и железомарганцевых руд для получения высококачественных концентратов. Все продукты переработки пригодны к использованию. Применение оптимальных технологических параметров обогащения позволяет из полиметаллического марганецсодержащего сырья извлекать 95 – 97 % марганца, до 80 % никеля, до 99 % кобальта, 96 – 98 % железа. В результате осаждения этих элементов получают высококачественные концентраты марганца, никеля, железа, кобальта. По предложенной технологической схеме для железомарганцевого сырья с высоким содержанием силикатов возможно получение высококачественных концентратов марганца и железа, при этом извлечение марганца составит 90 – 92 %, железа 86 – 90 %.

Ключевые слова: железомарганцевые руды, полиметаллические марганцевые руды, обогащение, технологическая схема, термодинамические исследования

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Субъекта РФ (Кемеровская область – Кузбасс) в рамках научного проекта № 20-48-420001/20.

Для цитирования: Нохрина О.И., Рожихина И.Д., Рыбенко И.А., Голодова М.А., Израильский А.О. Гидрометаллургическое обогащение полиметаллических и железомарганцевых руд // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 4. С. 273–281.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-4-273-281>

Original article

HYDROMETALLURGICAL ENRICHMENT OF POLYMETALLIC AND AND FERROMANGANESE ORE

O. I. Nokhrina, I. D. Rozhikhina, I. A. Rybenko,
M. A. Golodova, A. O. Izrail'skii

■ **Siberian State Industrial University** (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)

Abstract. The article presents the results of theoretical and experimental studies of leaching of polymetallic manganese-containing and ferromanganese ore. Thermodynamic calculations and experimental studies on enrichment of manganese-containing raw materials made it possible to determine the main technological parameters of the extraction of manganese, iron and non-ferrous metals, and to develop technological schemes for enrichment of various types of manganese-containing raw materials. The studies were carried out for polymetallic and ferromanganese ores of the Kaigadat deposit, the Selezhen deposit, the Sugul site, located in the Kemerovo Region – Kuzbass. Before carrying out laboratory studies, the authors have performed thermodynamic analysis of ore leaching, chemical and X-ray structural analyzes of the samples. Laboratory tests were carried out on a multi-chamber autoclave unit MKA-4-75 using calcium and iron chlorides as solvents. Since the introduction of a reducing agent into the charge during leaching significantly improves the conditions for dissolution of oxides and hydroxides of manganese in calcium chloride, a series of experiments was conducted with the use of charcoal in the charge. Thermodynamic calculations have shown that the leaching process is fully implemented in the temperature range from 323 to 673 K. The results of the experiments confirmed the theoretical research results. The obtained data allowed the authors

to propose a technological scheme for hydrometallurgical enrichment of polymetallic and ferromanganese ores to produce high-quality concentrates. All processed products are suitable for use. The use of optimal technological parameters of enrichment allows 95–97 % of manganese, up to 80 % of nickel, up to 99 % of cobalt, and 96–98 % of iron to be extracted from polymetallic manganese-containing raw materials. As a result of the deposition of these elements, high-quality concentrates of manganese, nickel, iron, cobalt are obtained. According to the proposed technological scheme for ferromanganese raw materials with a high content of silicates, it is possible to obtain high-quality concentrates of manganese and iron, while the extraction of manganese is 90–92 %, and of iron – 86–90 %.

Keywords: ferromanganese ores, polymetallic manganese ores, enrichment, technological scheme, thermodynamic research

Funding: The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research and the Subject of the Russian Federation (Kemerovo Region – Kuzbass) in the framework of the scientific project No. 20-48-42001/20.

For citation: Nokhrina O.I., Rozhikhina I.D., Rybenko I.A., Golodova M.A., Izrail'skii A.O. Hydrometallurgical enrichment of polymetallic and ferromanganese ore. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 4, pp. 273–281. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-4-273-281>

АКТУАЛЬНОСТЬ

Острота проблемы обеспечения марганцевыми ферросплавами на сегодняшний день определяется низким уровнем развития марганцевой рудной базы, а также отсутствием современных предприятий по добыче и подготовке марганцевого сырья для его использования в металлургии.

Без марганцевых ферросплавов не может обойтись производство стали подавляющего большинства марок. Содержание марганца в сталях обычно составляет от 0,5 до 2,0 %, а в некоторых и до 13,0 %.

Потребность России в марганцевых ферросплавах составляет порядка 600 – 650 тыс. т в год. Из импортных марганцевых руд выплавляется в основном ферромарганец углеродистый и силикомарганец. В последние годы в страну ввозится 800 – 1000 тыс. т марганцевых руд ежегодно, преимущественно из Казахстана, Бразилии, ЮАР, Турции [1].

В России имеются значительные балансовые запасы марганцевых руд (более 290 млн т), но марганцевые руды большинства отечественных месторождений отличаются невысоким качеством: при низком (18 – 33 %) содержании марганца и высоком (отношение Р/Мп более 0,006) удельном содержании фосфора они имеют повышенное содержание железа, кремнезема и относятся к труднообогащаемым. При этом около 90 % балансовых запасов приходится на карбонатное сырье [2 – 4].

На территории Кемеровской области – Кузбасса расположено самое крупное месторождение марганцевых руд Усинское, представленное в основном карбонатными высокофосфористыми рудами (98,5 млн т); Дурновское месторождение (около 300 тыс. т) – оксидные руды, большая часть из которых железомарганцевые; месторождение Селезень, представленное как богатыми валунчатými рудами (около 40 % Мп), так и обломками железомарганцевых руд (примерно 10 % Мп), сажистыми рудами (примерно 20 % Мп). Прогнозные запасы руды 5 млн т. В последние годы были выявлены проявления качественных марганцевых руд в пределах Алтае-Саянской металлогенической провинции участок Сугул; месторождение Селезень и участок Чумай в Кемеровской области, расположенные в Ташта-

гольском и Тисульском районах. При этом марганцевые руды месторождений Сугул и Чумай следует отнести к полиметаллическим рудам. Значительные запасы железомарганцевых руд находятся на Кайгадатском месторождении. В настоящее время эти руды не вовлечены в металлургическое производство.

Вовлечение в производство марганцевых руд этих месторождений возможно лишь при условии комплексного подхода к решению проблемы марганца, когда технически и экономически обоснованы все звенья одной цепочки: разведка месторождений, добыча и обогащение марганцевых руд, последующая их переработка и потребление.

Повышенный интерес к поискам новых способов обогащения бедных марганцевых и полиметаллических марганецсодержащих руд в последнее десятилетие отмечается как в России, так и за рубежом [5 – 18].

Комплекс работ, проведенных на кафедре металлургии черных металлов Сибирского государственного индустриального университета, показал возможность получения низкофосфористого марганцевого концентрата из карбонатных марганцевых руд. Использование для получения высококачественного марганцевого концентрата автоклавного выщелачивания марганца насыщенным раствором хлорида кальция с добавками до 5 % раствора хлорида железа и древесного угля позволяет применять этот метод для обогащения оксидных марганцевых руд [5].

Использование марганцевого концентрата в составе шихтовых материалов при производстве марганцевых ферросплавов в электропечах снижает удельный расход электроэнергии, повышает извлечение марганца и улучшает технико-экономические показатели производства. Полученные концентраты могут быть использованы для прямого легирования марганцем при обработке стали на агрегате печь-ковш.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И МАТЕРИАЛЫ

Для изучения возможности обогащения марганцевых руд были исследованы руды Кайгадатского месторождения, сажистые руды и руды с брекчиевой текстурой месторождения Селезень, руды участка Сугул. Был проведен химический и рентгеноструктурный анализы

проб исходных руд. Химический анализ проводили с использованием стандартных методик в соответствии с ГОСТ 22772 – 96. Рентгеноструктурный анализ делали с использованием установки ДРОН-2.

Перед лабораторными исследованиями по комплексному обогащению марганцевых руд были проведены термодинамические исследования процессов выщелачивания металлов с использованием программного комплекса «Терра» [19].

Рассматривали следующие элементарные термодинамические системы: $MnO + FeCl_2 + H_2O$, $NiO + FeCl_2 + H_2O$, $CoO + FeCl_2 + H_2O$. Процессы в этих системах можно представить в виде следующих реакций:



Также была проведена термодинамическая оценка протекания реакции



Состав систем формировали в молях компонентов, количество каждого компонента 1 моль для всех систем. Расчеты проводили при давлении 0,1 МПа в диапазоне температур 273 – 673 К.

С использованием программного комплекса «Терра» были рассчитаны изменения энергии Гиббса для реакций (1) – (3) в зависимости от температуры и проведены термодинамические исследования процессов, протекающих по этим реакциям.

Лабораторные исследования по изучению выщелачивания оксидов марганца, железа, никеля и кобальта проводили на многокамерной автоклавной установке МКА-4-75. В установке одновременно помещаются четыре автоклава объемом 75 см³. Для перемешивания раствора при выщелачивании автоклавы закрепляли в металлической рамке, которую вращали в муфельной печи со скоростью 80 об/мин.

В качестве растворителя использовали насыщенный раствор хлорида кальция. Для приготовления раствора использовали технический $CaCl_2$ с содержанием около 96,6 % $CaCl_2$. Раствор $FeCl_2$ готовили растворением мягкого железа в соляной кислоте. Использовали древесный уголь марки А.

Методика эксперимента была следующая: навеску растворяемого материала загружали в автоклав, после чего заливали растворитель при соотношении Т:Ж = 1:(3 ÷ 4), автоклавы закрывали, закрепляли во вращающейся рамке, после чего температуру в камере поднимали до заданной величины. Продолжительность выдержки отсчитывали с момента достижения заданной температуры. После окончания опыта автоклавы извлекали из камеры и охлаждали до температуры примерно 80 – 90 °С, раствор отфильтровывали, остаток промывали, сушили при температуре 105 °С и анализировали. Извлечение марганца, железа, никеля и кобальта оценивали по содержанию этих элементов и массе хвостов.

Было проведено две серии опытов: в первой изучали условия выщелачивания марганца и примесей цветных металлов из полиметаллических марганецсодержащих руд, во второй – условия выщелачивания марганца и железа из железомарганцевых руд с высоким содержанием кремнезема.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Химический и фазовый составы марганцевых руд приведены в табл. 1, 2.

Из приведенных данных следует, что руды участка Сугул бедные, так как содержание марганца на уровне 18 % и высокое содержание кремнезема (примерно 50 %). Руды Кайгадатского месторождения, сажистые руды и руды с брекчиевой текстурой месторождения Селезень имеют высокое содержание железа и кремнезема. Поэтому руды этих месторождений не могут быть использованы для выплавки стандартных марганцевых сплавов, их необходимо обогащать. Кроме того, в рудах участка Сугул достаточно высокое содержание цветных металлов, которые также, как и марганец, могут быть

Т а б л и ц а 1

Результаты химического анализа марганцевых руд

Table 1. Results of chemical analysis of manganese ores

Месторождение (руда)	Содержание, %									
	MnO	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	P	Ni	Co	Cu
Сугул	26,33	50,06	0,91	0,88	6,65	2,89	0,050	0,5	3,0	0,7
Селезень (сажистая)	18,37	62,00	1,94	1,83	4,86	7,32	0,104	–	–	–
Селезень (с брекчиевой текстурой)	14,76	59,31	1,48	1,30	7,51	12,68	0,101	–	–	–
Кайгадатское	11,2	49,20	1,35	1,62	3,20	26,70	0,110	–	–	–

Фазовый состав марганцевых руд

Table 2. Phase composition of manganese ores

Месторождение (руда)	Фазовый состав		
	много	присутствует	немного
Селезень (сажистая)	SiO ₂ – кварц	пирролизит MnO ₂ , рентгеноаморфное вещество	Fe ₂ O ₃ , тальк, примеси
Селезень (брекчиевая)	SiO ₂ – кварц	криptomелан – K ₂₋₃ Mn ₈ O ₁₆ , HFeO ₂ – гетит	гидромусковит, примеси
Сугул	тодорокит	кварц, криptomелан	вернадит, примеси
Кайгадатское	SiO ₂ – кварц	криptomелан – K ₂₋₃ Mn ₈ O ₁₆ , рентгеноаморфное вещество	HFeO ₂ – гетит, тальк, примеси

извлечены при комплексном обогащении марганцевых руд. Следует отметить, что используемые руды имеют сложный фазовый состав.

Расчеты изменения энергии Гиббса для реакций (1) – (3) с использованием программного комплекса «Терра» в зависимости от температуры представлены на рис. 1.

Для всех трех реакций в рассматриваемом температурном интервале изменение изобарно-изотермического потенциала отрицательно и реакции протекают в прямом направлении.

Результаты исследования процесса выщелачивания марганца, никеля, кобальта по реакциям (1) – (3) представлены на рис. 2. Процесс полностью реализуем на всем заданном температурном интервале. Равновесный состав представлен соединениями MnCl₂ (0,58 кг/кг смеси) и Fe(OH)₂ (0,41 кг/кг смеси).

Аналогичные результаты получены для систем с никелем (рис. 2, б) и кобальтом (рис. 2, в). Процесс также полностью реализуется в интервале температур 323 – 673 К. В равновесном состоянии содержание хло-

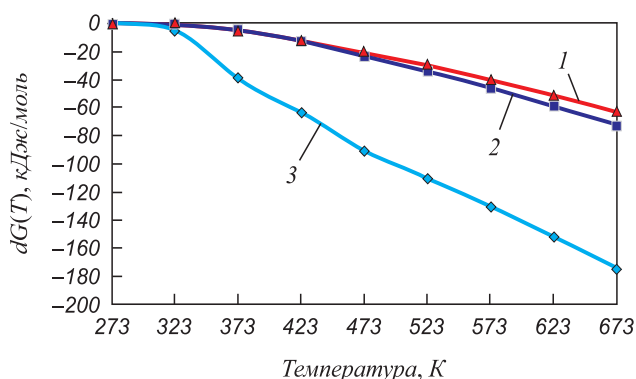


Рис. 1. Зависимости изменения изобарно-изотермического потенциала от температуры для реакций (1) – (3):

▲ – Mn; ◆ – Ni; ■ – Co; * – Fe

Fig. 1. Dependences of the change in isobaric-isothermal potential on temperature for reactions (1) – (3):

▲ – Mn; ◆ – Ni; ■ – Co; * – Fe

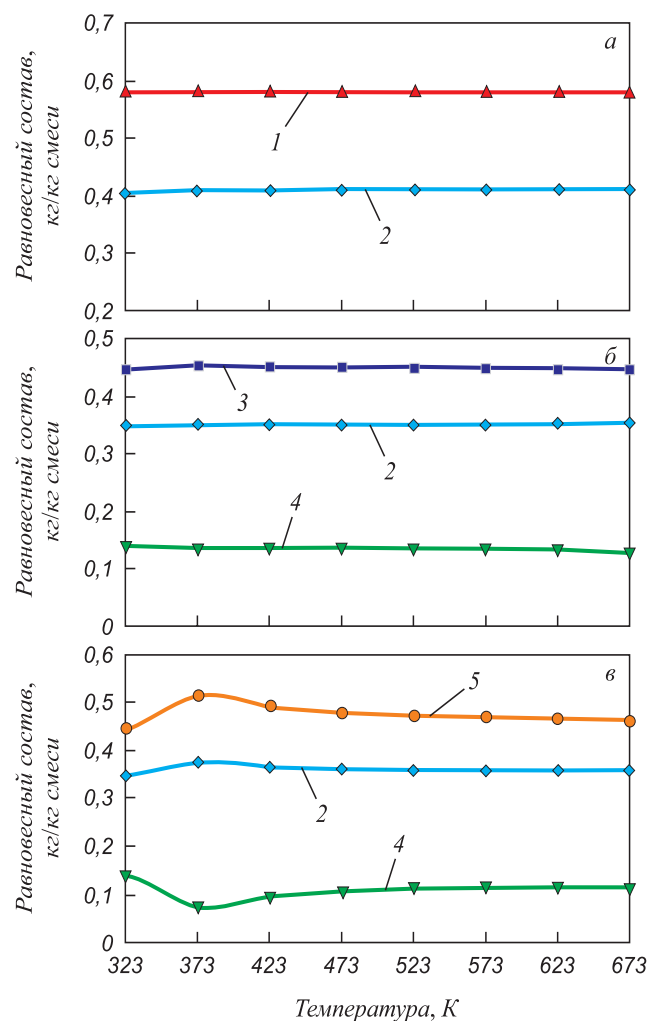


Рис. 2. Зависимости изменения равновесного состава систем MnO + FeCl₂ + H₂O (а), NiO + FeCl₂ + H₂O (б), CoO + FeCl₂ + H₂O (в) от температуры: 1 – MnCl₂(с); 2 – Fe(OH)₂; 3 – NiCl₂(с); 4 – FeCl₂(с); 5 – CoCl₂(с)

Fig. 2. Dependences of changes in the equilibrium composition of systems MnO + FeCl₂ + H₂O (а), NiO + FeCl₂ + H₂O (б), CoO + FeCl₂ + H₂O (в) on temperature: 1 – MnCl₂(с); 2 – Fe(OH)₂; 3 – NiCl₂(с); 4 – FeCl₂(с); 5 – CoCl₂(с)

Показатели извлечения марганца, кобальта, никеля и меди

Table 3. Indicators of extraction of manganese, cobalt, nickel and copper

Проба	Содержание в осадке, %					Извлечение, %			
	Mn	MnO ₂	Co	Ni	Cu	Mn	Co	Ni	Cu
1	0,015	следы	0,0073	0,112	0,085	99,17	97,76	74,79	68,97
2	0,013	следы	0,0019	0,080	0,075	99,20	99,15	81,77	72,80
3	0,015	следы	0,0020	0,120	0,095	99,18	99,25	69,94	59,31
4	0,013	следы	0,0022	0,125	0,113	99,25	99,28	72,38	58,73

рида никеля составляет 0,45 кг/кг смеси, для системы с кобальтом совместно с хлоридом кобальта (примерно 0,6 кг/кг смеси) присутствует порядка 0,06 кг/кг смеси. В обоих случаях присутствует также Fe(OH)₂ (примерно 0,35 кг/кг смеси).

Результаты теоретического анализа процессов выщелачивания марганца и примесей цветных металлов (рис. 2) показали, что при использовании в качестве растворителя хлорида железа эти элементы переходят в раствор практически полностью, а железо выпадает в осадок в виде гидроксида. Это позволит не использовать дополнительных операций для очистки раствора. Процесс протекает при температурах выше 423 К.

Результаты автоклавного выщелачивания проб руды участка Сугул при использовании в качестве растворителя хлорида железа приведены в табл. 3.

Результаты экспериментов подтвердили результаты теоретических исследований и показали, что при использовании в качестве растворителя раствора хлорида железа наряду с марганцем извлекаются в раствор никель и кобальт. Использование технологической схемы [20] показало, что при автоклавном выщелачивании полиметаллических марганецсодержащих руд с высоким содержанием кремнезема после селективного осаждения этих элементов можно получать высококачественные концентраты: марганцевый (57 – 59 % Mn); никелевый (44 – 46 % Ni); железный (58 – 60 % Fe); кобальтовый (31 – 33 % Co). Применение оптимальных технологических параметров обогащения позволяет извлекать из сырья до 99 % марганца, 80 % никеля, 99 % кобальта.

При обогащении железомарганцевых руд наряду с марганцем целесообразно извлекать железо. Результаты теоретического исследования процесса выщелачивания железа с использованием раствора CaCl₂ показали, что реализация процесса в рассматриваемом интервале температур невозможна (рис. 3).

В работе [5] теоретически и экспериментально было показано, что введение в шихту при выщелачивании восстановителя (древесный уголь) заметно улучшает условия растворения оксидов и гидроксидов марганца (особенно MnO) в хлористом кальции. Поэтому для выщелачивания марганца и железа из железомарганце-

вых руд вводили в шихту древесный уголь. Результаты экспериментов показали, что введение в шихту древесного угля в количестве 1,0 – 1,5 % позволяет извлекать 85 – 90 % железа и только 43 – 46 % марганца (I стадия). Для повышения эффективности извлечения марганца осадок после обработки руды растворами хлорида кальция с добавками древесного угля подвергали выщелачиванию раствором хлорида кальция с добавками 2,6 % хлорида железа FeCl₂ (II стадия). В табл. 4 приведены результаты выщелачивания железомарганцевых руд с высоким содержанием силикатов. Как показали результаты исследований, раствор FeCl₂ не только улучшает полноту протекания процесса, но и ускоряет растворение марганца из оксидов и силикатов.

На основании результатов исследования может быть предложена двухстадийная схема обогащения железомарганцевых руд Кузбасса (рис. 4). Использование предложенной схемы позволит получать высококачественные концентраты марганца (58 – 60 % Mn), железа (48 – 54 % Fe), при этом извлечение марганца составит 90 – 92 %, железа 86 – 90 %. Все продукты переработки пригодны к использованию в металлургическом производстве.

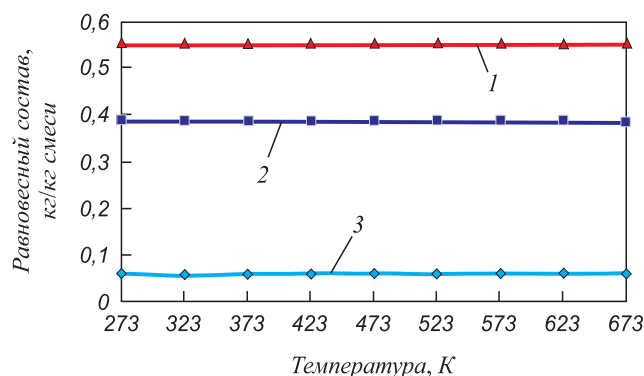


Рис. 3. Зависимости изменения равновесного состава системы FeO + CaCl₂ + H₂O от температуры: 1 – Fe₃O₄(c); 2 – CaCl₂(c); 3 – H₂O

Fig. 3. Dependences of changes in the equilibrium composition of the system FeO + CaCl₂ + H₂O on temperature: 1 – Fe₃O₄(c); 2 – CaCl₂(c); 3 – H₂O

Результаты выщелачивания железомарганцевых руд

Table 4. Results of ferromanganese ores leaching

Месторождение (руда)	Содержание Mn/Fe в «хвостах», % (I стадия)	Содержание Mn/Fe в осадке, % (II стадия)	Содержание Mn (III стадия)	Извлечение Mn
Селезень (сажистая)	0,78/2,045	1,64/54,73	59,6	90
Селезень (с брекчиевой текстурой)	0,55/1,160	0,30/47,76	59,1	91,1
Кайгадатское	0,62/1,39	0,96/49,35	58,9	90,2

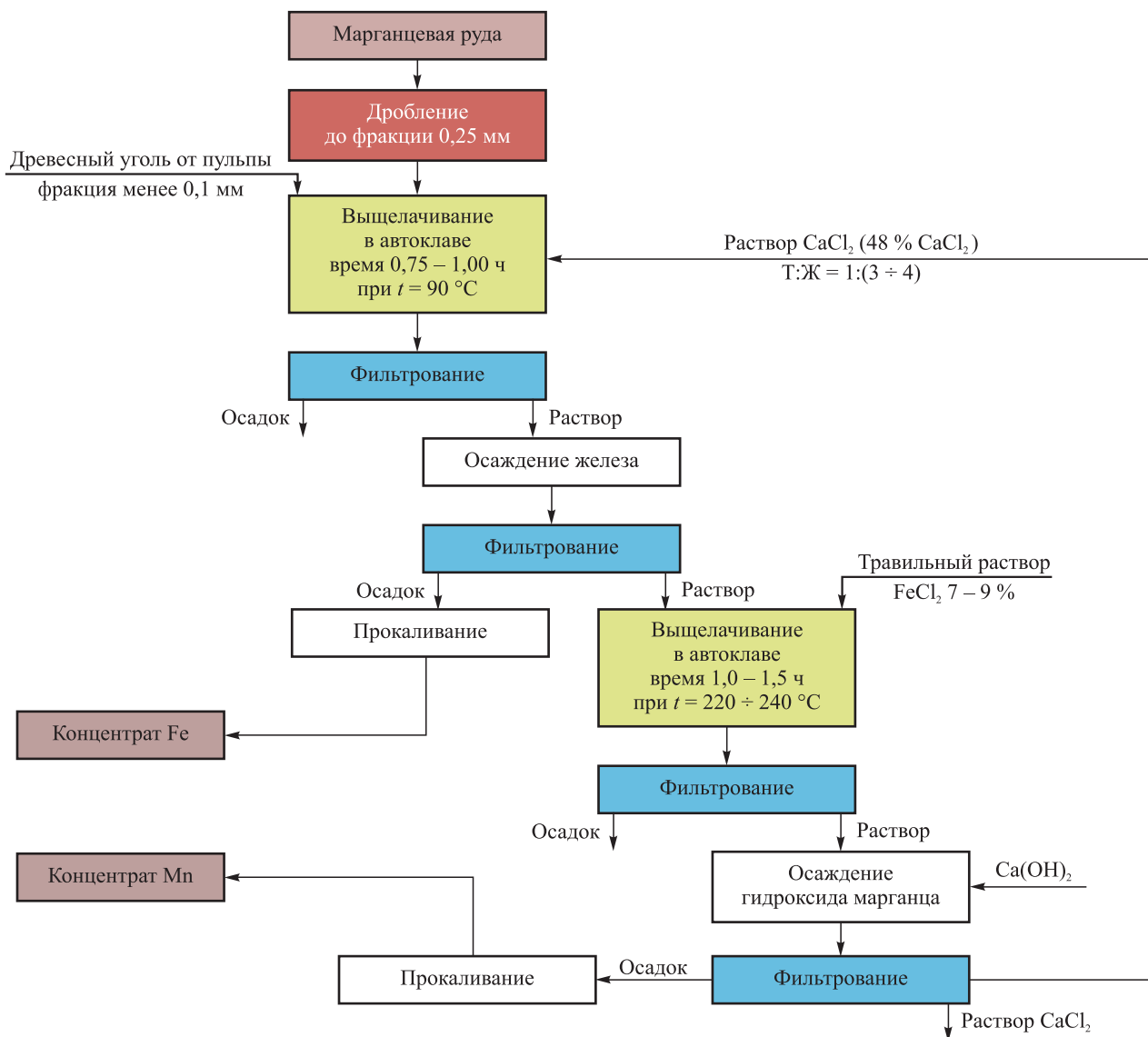


Рис. 4. Схема обогащения железомарганцевых руд

Fig. 4. Scheme of ferromanganese ore enrichment

Выводы

Термодинамические расчеты, выполненные с использованием программного комплекса «Терра», и экспериментальные исследования по обогащению марганец-

содержащего сырья позволили определить основные технологические параметры извлечения марганца, железа и цветных металлов, разработать технологические схемы обогащения различных видов марганецсодержащего сырья.

Результаты теоретических исследований процессов выщелачивания марганца, кобальта, никеля из полиметаллических марганцевых руд с использованием в качестве растворителя раствора хлорида железа (II) показали, что в температурном интервале 323 – 673 К изменение изобарно-изотермического потенциала отрицательно и реакции выщелачивания протекают в прямом направлении.

Результаты экспериментов подтвердили данные теоретических исследований и показали, что при использовании в качестве растворителя раствора хлорида железа наряду с марганцем извлекаются в раствор никель и кобальт. Указанные элементы переходят в раствор практически полностью, а железо выпадает в осадок в виде гидроксида. Это позволит не использовать дополнительных операций для очистки раствора. Процесс протекает при температурах выше 423 К.

Применение в шихте для выщелачивания железомарганцевых руд с высоким содержанием силикатов 1,0 – 1,5 % древесного угля позволяет извлекать

86 – 90 % железа (I стадия) и введение в растворитель CaCl_2 2,6 % хлорида железа (II) позволяет извлекать 90 – 92 % марганца (II стадия).

При автоклавном выщелачивании полиметаллических марганецсодержащих руд с высоким содержанием кремнезема после селективного осаждения этих элементов можно получать высококачественные концентраты: марганцевый (57 – 59 % Mn); никелевый (44 – 46 % Ni); железный (58 – 60 % Fe); кобальтовый (31 – 33 % Co).

На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований предложены схема обогащения марганцевых полиметаллических руд и двухстадийная схема обогащения железомарганцевых руд. Использование предложенной схемы обогащения железомарганцевых руд позволит получать высококачественные концентраты марганца (58 – 60 % Mn), железа (48 – 54 % Fe). Применение оптимальных технологических параметров обогащения позволяет извлекать из сырья до 97 % марганца, 80 % никеля, 99 % кобальта, 96 – 98 % железа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Группа аналитиков по изучению сырья, металлов и продукции из них International Metallurgical Research Group. Екатеринбург, 2009. URL: <http://metalresearch.ru> (дата обращения 24.04.2020).
2. Борисов С.М., Зябкин А.В., Старкин С.С. Результаты геолого-разведочных работ на марганцевые руды в Кемеровской области. В кн.: Состояние марганцево-рудной базы России и вопросы обеспечения промышленности марганцем. Материалы научно-технической конференции. Красноярск: КНИИГиМС, 2001. С. 36–38.
3. Литвинцева Э.Г., Тигунов Л.П., Бронницкая Е.С. и др. Разработка эффективных способов обогащения и переработки окисленных и карбонатных руд марганца месторождений России. В кн.: Состояние марганцево-рудной базы России и вопросы обеспечения промышленности марганцем. Материалы научно-технической конференции. Красноярск: КНИИГиМС, 2001. С. 138–143.
4. Федоров Ю.О. Опыт и практика рентгенорадиометрического обогащения марганцевых руд. В кн.: Состояние марганцево-рудной базы России и вопросы обеспечения промышленности марганцем. Материалы научно-технической конференции. Красноярск: КНИИГиМС, 2001. С. 163–165.
5. Нохрина О.И., Рожихина И.Д., Прошунин И.Е. Получение высококачественных концентратов при обогащении марганцевых руд. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2019. 182 с.
6. Нохрина О.И., Рожихина И.Д., Прошунин И.Е., Ходосов И.Е. Обогащение полиметаллических марганецсодержащих руд и рациональное использование полученных концентратов // Известия вузов. Черная металлургия. 2015. Т. 58. № 5. С. 309–315. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2015-5-309-315>
7. Нохрина О.И., Рожихина И.Д. Получение малофосфористого концентрата из руд и железомарганцевых конкреций // Известия вузов. Черная металлургия. 2000. № 8. С. 40–45.
8. Сутырин Ю. Анализ состояния гидromеталлургической переработки марганцевого сырья // Национальная металлургия. 2003. № 2. С. 99–104.
9. Vracar R.Z., Cerovic K.P. Manganese leaching in the FeS_2 – MnO_2 – O_2 – H_2O system at high temperature in an autoclave // Hydrometallurgy. 2000. Vol. 55. No. 1. P. 79–92. [http://doi.org/10.1016/S0304-386X\(99\)00076-6](http://doi.org/10.1016/S0304-386X(99)00076-6)
10. Hatk P.K., Sukla L.B., Das S.C. Aqueous SO_2 leaching studies on Nishikhal manganese ore through factorial experiment //
1. Group of Analysts for the Study of Raw Materials, Metals and Products from Them. International Metallurgical Research Group. Yekaterinburg, 2009. Available at URL: <http://metalresearch.ru> (accessed 24.04.2020). (In Russ.).
2. Borisov S.M., Zyabkin A.V., Starkin S.S. Results of exploration work for manganese ores in Kemerovo Region. In: *State of Manganese-Ore Base in Russia and Providing the Industry with Manganese: Materials of the Sci. and Tech. Conf.* Krasnoyarsk: KNIIGiMS, 2001, pp. 36–38. (In Russ.).
3. Litvintseva E.G., Tigonov L.P., Bronitskaya E.S., etc. Development of Efficient methods for enrichment and processing of oxidized and carbonate manganese ores from Russian deposits. In: *State of Manganese-Ore Base in Russia and Providing the Industry with Manganese: Materials of the Sci. and Tech. Conf.* Krasnoyarsk: KNIIGiMS, 2001, pp. 138–143. (In Russ.).
4. Fedorov Yu.O. Experience and practice of X-ray radiometric enrichment of manganese ores. In: *State of Manganese-Ore Base in Russia and Providing the Industry with Manganese: Materials of the Sci. and Tech. Conf.* Krasnoyarsk: KNIIGiMS, 2001, pp. 163–165. (In Russ.).
5. Nokhrina O.I., Rozhikhina I.D., Proshunin I.E. *Production of High-Quality Concentrates by Manganese Ores Processing*. Novokuznetsk: RC SibSIU, 2019, 182 p. (In Russ.).
6. Nokhrina O.I., Rozhikhina I.D., Proshunin I.E., Khodosov E.I. Polymetallic manganese ore dressing and optimal use of the obtained concentrates. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2015, vol. 58, no. 5, pp. 309–315. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2015-5-309-315>
7. Nokhrina O.I., Rozhikhina I.D. Obtaining low-phosphorus concentrates from ores and ferromanganese nodules. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2000, no. 8, pp. 40–45. (In Russ.).
8. Sutyurin Yu. Analysis of the state of hydrometallurgical processing of manganese raw materials. *Natsional'naya metallurgiya*. 2003, no. 2, pp. 99–104. (In Russ.).
9. Vracar R.Z., Cerovic K.P. Manganese leaching in the FeS_2 – MnO_2 – O_2 – H_2O system at high temperature in an autoclave. *Hydrometallurgy*. 2000, vol. 55, no. 1, pp. 79–92. [http://doi.org/10.1016/S0304-386X\(99\)00076-6](http://doi.org/10.1016/S0304-386X(99)00076-6)
10. Hatk P.K., Sukla L.B., Das S.C. Aqueous SO_2 leaching studies on Nishikhal manganese ore through factorial experiment. *Hydrome-*

- Hydrometallurgy. 2000. Vol. 54. No. 2. P. 217–228.
[http://doi.org/10.1016/S0304-386X\(99\)00075-4](http://doi.org/10.1016/S0304-386X(99)00075-4)
11. Trifoni M., Toro L., Vegliu F. Reductive leaching of manganiferous ores by glucose and H₂SO₄: Effect of alcohols // *Hydrometallurgy*. 2001. Vol. 59. No. 1. P. 1–14.
[http://doi.org/10.1016/S0304-386X\(00\)00138-9](http://doi.org/10.1016/S0304-386X(00)00138-9)
 12. Veglio F., Trifoni M., Abbruzzese C., Toro L. Column leaching of a manganese dioxide ore: A study by using fractional factorial design // *Hydrometallurgy*. 2001. Vol. 59. No. 1. P. 31–44.
[http://doi.org/10.1016/S0304-386X\(00\)00139-0](http://doi.org/10.1016/S0304-386X(00)00139-0)
 13. Ding P., Liu Q.J., Pang W.H. A review of manganese ore beneficiation situation and development // *Applied Mechanics and Materials*. 2013. Vol. 380–384. P. 4431–4433.
<http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.380-384.4431>
 14. Kang T., Liu Y., Huang Y., Dong J., Huang Q., Li Y. Synthesis and dephosphorization of iron manganese composite oxide by acid leaching on iron manganese ore // *Advanced Materials Research*. 2012. Vol. 554–556. P. 489–493.
<http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.554-556.489>
 15. Sun Da, Li Mao-lin, Li Can-hua, Cul Rui, Zheng Xia-yu. Green enriching process of Mn from low grade ore of manganese carbonate // *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 644–650. P. 5427–5430.
<http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.644-650.5427>
 16. Yang Z.Z., Li G.Q., Huang C.H., Ding J.F. Mn ore smelting reduction based on double slag operation in BOF // *Applied Mechanics and Materials*. 2013. Vol. 753–755. P. 76–80.
<http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.753-755.76>
 17. Pan M.C., Liu X.L., Zou R., Huang J., Han J.C. Study of heat treatment technology on medium-carbon-low-alloy-steel large hammer formation of gradient performance // *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 881–883. P. 1288–1292.
<http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.881-883.1288>
 18. Šalák A., Selecká M. Effect of manganese addition and sintering conditions on mechanical properties of low carbon 3Cr prealloyed steels // *Materials Science Forum*. 2011. No. 672. P. 55–58.
<http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.672.55>
 19. Трусов Б.Г. Программная система ТЕРРА для моделирования фазовых и химических равновесий при высоких температурах. В кн.: III Международный симпозиум «Горение и плазмохимия». 24–26 августа 2005. Алматы, Казахстан. Алматы: Казак университети, 2005. С. 52–57.
 20. Пат. № 2583224 РФ. Способ химического обогащения полиметаллических марганецсодержащих руд / О.И. Нохрина, И.Д. Рожихина, П.Д. Кравченко, О.Ю. Кичигина, М.С. Костюк. Заявл. 12.01.2015; опубл. 10.05.2016. Бюл. № 13.
tallurgy. 2000, vol. 54, no. 2, pp. 217–228.
[http://doi.org/10.1016/S0304-386X\(99\)00075-4](http://doi.org/10.1016/S0304-386X(99)00075-4)
 11. Trifoni M., Toro L., Vegliu F. Reductive leaching of manganiferous ores by glucose and H₂SO₄: Effect of alcohols. *Hydrometallurgy*. 2001, vol. 59, no. 1, pp. 1–14.
[http://doi.org/10.1016/S0304-386X\(00\)00138-9](http://doi.org/10.1016/S0304-386X(00)00138-9)
 12. Veglio F., Trifoni M., Abbruzzese C., Toro L. Column leaching of a manganese dioxide ore: A study by using fractional factorial design. *Hydrometallurgy*. 2001, vol. 59, no. 1, pp. 31–44.
[http://doi.org/10.1016/S0304-386X\(00\)00139-0](http://doi.org/10.1016/S0304-386X(00)00139-0)
 13. Ding P., Liu Q.J., Pang W.H. A review of manganese ore beneficiation situation and development. *Applied Mechanics and Materials*. 2013, vol. 380–384, pp. 4431–4433.
<http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.380-384.4431>
 14. Kang T., Liu Y., Huang Y., Dong J., Huang Q., Li Y. Synthesis and dephosphorization of iron manganese composite oxide by acid leaching on iron manganese ore. *Advanced Materials Research*. 2012, vol. 554–556, pp. 489–493.
<http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.554-556.489>
 15. Sun Da, Li Mao-lin, Li Can-hua, Cul Rui, Zheng Xia-yu. Green enriching process of Mn from low grade ore of manganese carbonate. *Applied Mechanics and Materials*. 2014, vol. 644–650, pp. 5427–5430.
<http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.644-650.5427>
 16. Yang Z.Z., Li G.Q., Huang C.H., Ding J.F. Mn ore smelting reduction based on double slag operation in BOF. *Applied Mechanics and Materials*. 2013, vol. 753–755, pp. 76–80.
<http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.753-755.76>
 17. Pan M.C., Liu X.L., Zou R., Huang J., Han J.C. Study of heat treatment technology on medium-carbon-low-alloy-steel large hammer formation of gradient performance. *Advanced Materials Research*. 2014, vol. 881–883, pp. 1288–1292.
<http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.881-883.1288>
 18. Šalák A., Selecká M. Effect of manganese addition and sintering conditions on mechanical properties of low carbon 3Cr prealloyed steels. *Materials Science Forum*. 2011, no. 672, pp. 55–58.
<http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.672.55>
 19. Trusov B.G. TERRA software system for modeling phase and chemical equilibria at high temperatures. In: *III Int. Symp. "Combustion and Plasma Chemistry". 24–26 August 2005. Almaty, Kazakhstan*. Almaty: Kazak universiteti, 2005, pp. 52–57. (In Russ.).
 20. Nokhrina O.I., Rozhikhina I.D., Kravchenko P.D., Kichigina O.Yu., Kostyuk M.S. *Method of chemical enrichment of polymetallic manganese-containing ores*. Patent RF no. 2583224. *Bulleten' izobretnii*. 2016, no. 13. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ольга Ивановна Нохрина, д.т.н., профессор кафедры металлургии черных металлов, Сибирский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0002-8591-1481

E-mail: nvi52@mail.ru

Ирина Дмитриевна Рожихина, д.т.н., профессор кафедры металлургии черных металлов, Сибирский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0001-6233-504X

E-mail: rojihina_id@mail.ru

Инна Анатольевна Рыбенко, д.т.н., профессор кафедры прикладных информационных технологий и программирования, Сибирский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0003-1679-0839

E-mail: rybenkoi@mail.ru

OI'ga I. Nokhrina, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0002-8591-1481

E-mail: nvi52@mail.ru

Irina D. Rozhikhina, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0001-6233-504X

E-mail: rojihina_id@mail.ru

Inna A. Rybenko, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Applied Information Technology and Programming, Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0003-1679-0839

E-mail: rybenkoi@mail.ru

Марина Анатольевна Голодова, к.т.н., доцент кафедры архитектуры, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: golodova_ma@mail.ru

Александр Олегович Израильский, магистрант кафедры металлургии черных металлов, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: salomon89@mail.ru

Marina A. Golodova, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair of Architecture, Siberian State Industrial University

E-mail: golodova_ma@mail.ru

Aleksandr O. Izrail'skii, MA Student of the Chair of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University

E-mail: salomon89@mail.ru

Поступила в редакцию 29.06.2020

После доработки 19.10.2020

Принята к публикации 26.10.2020

Received 29.06.2020

Revised 19.10.2020

Accepted 26.10.2020
