



Оригинальная статья

УДК 669

DOI 10.17073/0368-0797-2022-8-531-538

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2364>

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ МАРГАНЦЕВЫХ СПЛАВОВ ИЗ БЕДНЫХ КАРБОНАТНЫХ И ОКСИДНЫХ РУД В АГРЕГАТЕ СЭР

И. А. Рыбенко¹, Ф. Конголи²

¹ Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

² FLOGEN Technologies Inc. (3422 Old Capitol Trail No. 791 Wilmington, DE USA, 19808-6192)

Аннотация. В работе представлены результаты разработки и исследования новой ресурсосберегающей технологии переработки бедных оксидных и карбонатных марганцевых руд в агрегате струйно-эмульсионного типа СЭР. Рассмотрены основные принципы создания струйного агрегата и технология переработки пылевидных марганцевых руд. Для предварительного восстановления марганца из высших оксидов или разложения карбонатов, а также удаления влаги из руды предлагается использовать восстановительный газ, который является продуктом реализации технологии восстановления марганца в агрегате СЭР. Таким образом предлагается замкнуть процесс, то есть создать согласованный поток вещества и энергии, проходящий через основной агрегат СЭР, и подготовительный агрегат кипящего слоя. Основная задача расчета предлагаемой технологии заключается в определении расхода сырой руды в агрегате кипящего слоя, чтобы получить заданный выход полупродукта и одновременно обеспечить возможность полного перевода высших оксидов или карбонатов сырой руды в низшие оксиды восстановительным газом, получаемым в основном агрегате. Для решения этой проблемы поставлена и реализована задача оптимизации. Первый этап – подбор состава и расхода восстановительного газа и определение расхода исходной марганцевой руды, обеспечивающего выход заданного количества полупродукта. Второй этап – решение задачи оптимизации по выходу и составу газа, который должен обеспечивать процесс восстановления во втором агрегате. В работе представлены результаты расчета технологии переработки в агрегате СЭР для оксидной руды Селезенского и карбонатной руды Усинского месторождений. Проведен сравнительный анализ двух вариантов переработки марганцевых руд по предлагаемой технологии и по технологии без предварительного восстановления и обжига. Предложенная технология переработки марганцевых руд в агрегате СЭР с замкнутым циклом позволяет значительно снизить удельные расходы материалов, повысить производительность, значительно уменьшить энергоёмкость процесса по сравнению с технологией переработки бедных марганцевых руд без предварительного восстановления или обжига.

Ключевые слова: агрегат струйно-эмульсионного типа, бедная пылевидная марганцевая руда, восстановление марганца, ресурсосберегающая технология

Для цитирования: Рыбенко И.А., Конголи Ф. Определение оптимальных режимов технологии получения марганцевых сплавов из бедных карбонатных и оксидных руд в агрегате СЭР // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 8. С. 531–538.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-8-531-538>

Original article

DETERMINATION OF OPTIMAL TECHNOLOGICAL MODES FOR OBTAINING MANGANESE ALLOYS FROM POOR CARBONATE AND OXIDE ORES IN A JET-EMULSION UNIT

I. A. Rybenko¹, F. Kongoli²

¹ Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)

² FLOGEN Technologies Inc. (3422 Old Capitol Trail No. 791 Wilmington, DE USA, 19808-6192)

Abstract. The paper presents the results of development and research of a new resource-saving technology for processing poor oxide and carbonate manganese ores in a unit of jet-emulsion type. The basic principles of creating a jet unit and the technology of processing pulverized manganese ores are considered. For the preliminary reduction of manganese from higher oxides or carbonates decomposition, as well as the removal of moisture from the ore, it is proposed to use a reducing gas, which is a product of the implementation of manganese reduction technology in jet-emulsion unit. Thus, the authors propose to close the process, that is, to create a consistent flow of substance and energy passing through the main jet-emulsion unit and the preparatory unit of the fluidized bed. The main task of calculating the proposed technology is to determine the consumption of crude ore in the fluidized bed unit in order to obtain a given yield of the intermediate product and at the same time to ensure the possibility of complete conversion of

high oxides or carbonates of crude ore into lower oxides by reducing gas produced in the main unit. To solve this problem, an optimization task was set and implemented. The first stage is selection of composition and consumption of the reducing gas and determination of consumption of the initial manganese ore, which provides the output of a given amount of the intermediate product. The second stage is solution of the optimization problem for output and composition of the gas, which should ensure the recovery process in the second unit. The paper presents the results of calculating the processing technology in the jet-emulsion unit for oxide ore of the Selezen'skoe and carbonate ore of the Usinskoe deposits. A comparative analysis of two options for processing manganese ores by the proposed technology and by the technology without preliminary recovery and roasting was carried out. The proposed technology of processing manganese ores in a closed-cycle jet-emulsion unit allows one to significantly reduce the specific costs of materials, increase productivity, and significantly reduce the energy intensity of the process compared to the technology of processing poor manganese ores without preliminary reduction or roasting.

Keywords: unit of jet-emulsion type, poor pulverized manganese ore, manganese recovery, resource-saving technology

For citation: Rybenko I.A., Kongoli F. Determination of optimal technological modes for obtaining manganese alloys from poor carbonate and oxide ores in a jet-emulsion unit. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 8, pp. 531–538. (In Russ.).

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-8-531-538>

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время ферромарганец получают, в основном, в шахтных руднотермических печах. Эти технологии достаточно хорошо отработаны [1–3], однако они являются энергозатратными. Получить высокое извлечение марганца из относительно бедных руд достаточно сложно из-за значительных затрат на их обогащение, особенно высокзатратной является технология переработки карбонатных руд [4–8]. В связи с этим предлагается технология прямого получения ферромарганца и марганцевых сплавов из пылевидных и мелкофракционных материалов в агрегате струйно-эмульсионного типа (СЭР) [9, 10], направленная, прежде всего, на переработку карбонатных руд и пылевидных окисленных концентратов [11, 12]. В основу непрерывного металлургического процесса струйно-эмульсионного типа СЭР положена идея реализации принципов синергетики и неравновесной термодинамики, позволившая создать теоретические основы процесса и универсальную конструкцию агрегата, в котором возможно осуществление различных процессов и технологий [9–18].

Основные принципы, положенные в основу процесса СЭР, сформулированы следующим образом: создание в реакционной камере большой реакционной поверхности с последующей организацией вынужденного движения образовавшейся газовой взвеси под давлением; использование эффекта газодинамического запирания выходного канала; создание неравновесного стационарного колебательного режима при заданном уровне давления; нижняя подача в вертикальный колонный реактор образовавшейся в реакционной камере двухфазной рабочей смеси [11, 12].

На основе этих принципов удалось перейти от системы пространственно разделенных металла, шлака и газа к потоку двухфазной среды, представляющей собой систему, состоящую из огромного количества микрореакторов, в которых в соизмеримых массовых соотношениях присутствуют металлическая, шлаковая и газовая фазы. Это обеспечивает высокие скорости тепломассообменных процессов, окислительно-восстановительных реакций и фазовых превращений [11, 12].

ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКИ МАРГАНЦЕВЫХ РУД

Технологическая схема переработки мелкофракционных марганцевых руд в агрегате СЭР представлена на рис. 1. Шихтовые материалы (марганцевый концентрат, уголь, пылевидные отходы, шлакообразующие) из системы подготовки шихты подаются в расходные бункеры 1, из которых через питатели 2 и дозатор 3 попадают в смеситель 4, а затем через бункер-питатель 5, ящичный конвейер 6 и шнековый питатель 7 под давлением подаются в реактор-осциллятор 8 агрегата СЭР, где при взаимодействии встречных струй кислорода или воздуха осуществляется диспергация шихты и неполное сжигание топлива до оксида СО [11, 12]. Приготовленная в этом реакторе газовзвесь через газодинамически запираемый соединительный канал 9 подается в нижнюю часть колонного реактора 12 под высокий слой газошлаковой эмульсии. В реакторе происходит газификация и дожигание более крупных частиц твердого топлива и восстановление оксидов.

К нижней части колонного реактора присоединяется индукционно подогреваемый копильник 13, в котором накапливаются восстановленные из оксидов железа, марганец и другие металлы. Обедненный, сильно вспененный шлак выталкивается под давлением из верхней части колонного реактора через соединительный канал 10 в шлакоприемник 18 с гранулятором 19. Полученный шлак может быть использован в качестве стройматериалов, адсорбентов и т.п.

Реакционный газ состоит преимущественно из оксида углерода, является очень эффективным восстановителем. Из верхней части шлакоприемника, который также играет роль сепаратора газа и шлака, подается под давлением в агрегат кипящего слоя 20 с марганцевым концентратом для предварительного восстановления до MnO оксидного концентрата или обжига карбонатного. Реализация этапа предварительной обработки марганцевого концентрата восстановительным газом из агрегата СЭР позволяет резко снизить энергоемкость производства ферромарганца [9].

Восстановленные в колонном реакторе 12 железо и марганец собираются в индукционно подогреваемом копильнике 13 и через летку 14 выпускаются (непре-

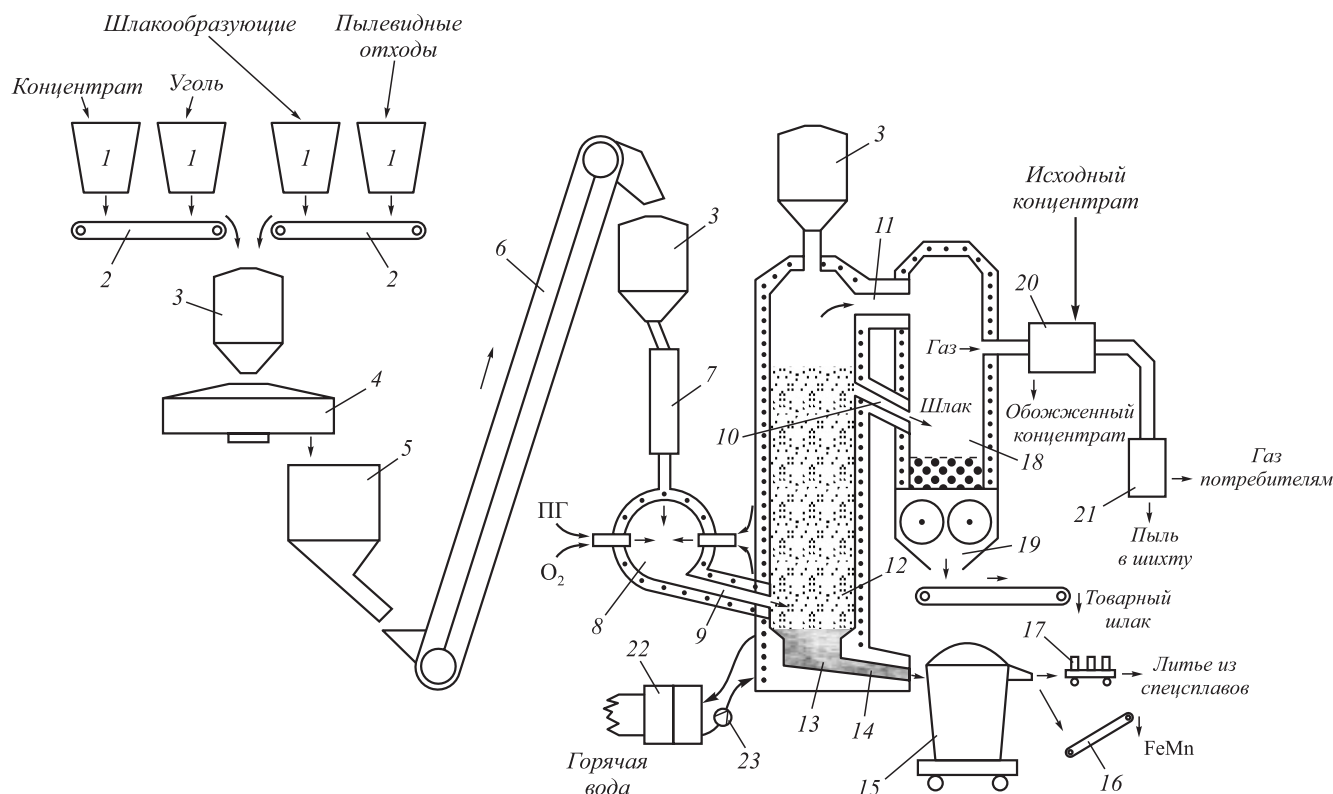


Рис. 1. Технологическая схема переработки мелкофракционных марганцевых концентратов:

1 – расходные бункеры; 2 – питатели; 3 – дозаторы; 4 – смеситель; 5 – бункер-питатель; 6 – ящичный конвейер; 7 – шнековый питатель; 8 – струйный реактор-осциллятор; 9 – 11 – соединительные каналы; 12 – колонный рафинирующий отстойник; 13 – индукционно подогреваемый копильник; 14 – летка для металла; 15 – приемный ковш или индукционная печь типа «Presspou»; 16 – разливочная машина; 17 – линия для специального литья; 18 – шлакоприемник; 19 – гранулятор высокопористого шлака; 20 – агрегат для сушки, обжига и предварительного восстановления концентрата; 21 – газопромыватель; 22 – теплообменник; 23 – циркуляционный насос; ПГ – природный газ

Fig. 1. Technological scheme for processing of small-fraction manganese concentrates:

1 – service bunkers; 2 – feeders; 3 – dispensers; 4 – mixer; 5 – bunker-feeder; 6 – box conveyor; 7 – screw feeder; 8 – jet reactor-oscillator; 9 – 11 – connecting channels; 12 – column refining settler; 13 – induction heating removable hoard; 14 – notch for metal; 15 – receiving ladle or induction furnace of the “Presspou” type; 16 – filling machine; 17 – line for special casting; 18 – slag receiver; 19 – highly porous slag granulator; 20 – unit for drying, firing and pre-recovery of the concentrate; 21 – gas washer; 22 – heat exchanger; 23 – circulation pump; ПГ – natural gas

рывно или периодически) в ковш или индукционную печь 15, где происходит усреднение состава металла, а в случае реализации технологии получения марганцовистых сталей – доводка металла до заданного состава. Из такого металла можно получать специальное литье, например, износостойкие детали [12]. Задача обеспечения стойкости элементов агрегата решается с помощью автоматизированной системы формирования и поддержания гарнисажа, включающей теплообменники высокого давления 22, средства контроля и управления [9]. На рис. 1 также показаны соединительный канал 11, разливочная машина 16, линия для специального литья 17, газопромыватель 21, циркуляционный насос 23.

Рассмотренная технология может быть применена для переработки марганцевых концентратов, например, Селезеньского месторождения Кемеровской области, особенно для переработки бедных пылевидных фракций (14 – 24 % Mn), которых в этих концентратах

почти половина. Это позволит уменьшить количество хвостов, увеличить степень извлечения марганца и продлить срок эксплуатации месторождения.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ

Для предварительного восстановления марганца и удаления влаги из руды предлагается использовать восстановительный газ, который является продуктом реализации технологии восстановления марганца в агрегате СЭР, и таким образом замкнуть процесс, то есть создать согласованный поток вещества и энергии, проходящий через основной и подготовительный (второй) агрегаты [11, 12]. Схема материальных и энергетических потоков для предлагаемой технологии приведена на рис. 2.

Основная задача расчета предлагаемой технологии заключалась в определении такого расхода сырой руды в агрегате кипящего слоя, чтобы получить заданный

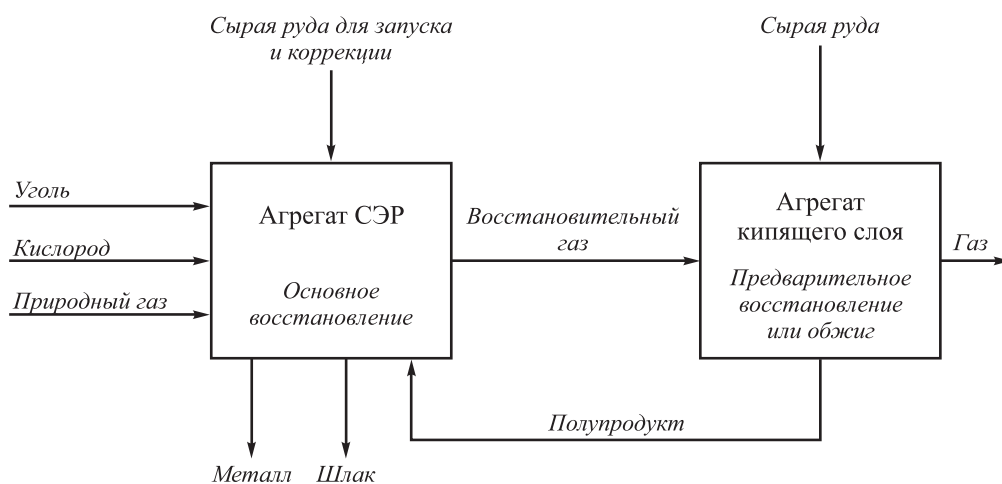


Рис. 2. Схема реализации технологии переработки марганцевых руд

Fig. 2. Scheme of implementation of manganese ore processing technology

выход полупродукта (в расчете выход полупродукта принят 1 кг/с) и одновременно обеспечить возможность полного перевода высших оксидов или карбонатов сырой руды в низшие оксиды восстановительным газом, получаемым в основном агрегате [11, 12]. Для решения этой проблемы была поставлена и реализована задача оптимизации. На первом этапе решалась задача подбора состава и расхода восстановительного газа, необходимого для полного восстановления высших оксидов марганца или разложения карбонатов, и определялся расход исходной марганцевой руды, обеспечивающий выход заданного количества полупродукта [11, 12].

При этой производительности осуществлялся расчет процесса в основном агрегате СЭР и определялся состав продуктов. Решалась задача оптимизации по выходу и составу газа, который должен обеспечивать процесс восстановления во втором агрегате. Определялись такие расходы угля и кислорода, при которых состав отходящего газа соответствовал необходимому, при выполнении ограничений на условия материального и теплового балансов при заданной температуре и на условия реализации восстановительных процессов при заданной степени восстановления железа и марганца. Для рассматриваемой технологии переработки марганцевых руд в агрегате типа СЭР с использованием инструментальной системы был проведен расчет на примере оксидной селезеньской и карбонатной усинской марганцевых руд [11, 12].

РАСЧЕТ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ РУДЫ

СЕЛЕЗЕНЬСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Мелкофракционная (2,5 – 8,0 мм) марганцевая руда Селезеньского месторождения имеет следующий химический состав [19], % (по массе): MnO 5,68; MnO₂ 31,66; SiO₂ 31,46; CaO 0,20; Fe_{общ} 14,30; P 0,12;

S 0,10; MgO 0,33; BaO 3,00; Cu 0,05; Zn 0,05; Pb 0,01; ППП 8,20.

Поскольку большая часть марганца в руде находится в виде оксида MnO₂, предлагается перевести его в низший оксид MnO в агрегате кипящего слоя путем использования восстановительного газа (расход 1,074 кг/с), который является продуктом реализации технологии восстановления марганца в основном агрегате СЭР (химический состав, % (по массе): CO 87,69; CO₂ 0,62; N₂ 0,75; H₂ 2,01; H₂O 8,93).

Полученный в результате решения задачи оптимизации расход окисленной руды составил 1,26 кг для получения 1 кг полупродукта.

После предварительного восстановления исходной руды в агрегате кипящего слоя получается полупродукт, который подается в первый реактор основного агрегата СЭР, где осуществляется восстановление оксидов марганца и железа. Материальный и тепловой балансы процесса приведены в табл. 1, 2. В результате реализации технологии получается марганцевый сплав состава, % (по массе): Fe 29,37; C 3,00; Mn 66,17; Si 1,42.

РАСЧЕТ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ РУДЫ

УСИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Специфической особенностью карбонатных марганцевых руд является многообразие минеральных форм марганца и гранулометрия (от долей миллиметров до нескольких сантиметров). Главные рудные минералы – карбонаты марганца: родохрозит, манганокальцит и марганцовистый кальцит. Химический состав марганцевой руды Усинского месторождения, % (по массе): Mn 19,33; P 0,18; Fe 5,96; SiO₂ 16,33; Al₂O₃ 1,67; CaO 14,84; MgO 3,17; S 0,06; ППП 24,98.

Результаты исследования процесса восстановления карбонатной марганцевой руды углем в инструментальной системе [7, 8] приведены на рис. 3. Расчет реали-

Т а б л и ц а 1

Материальный баланс технологии переработки селезеньских руд

Table 1. Material balance of processing technology for the ores of Selezén'skoe deposit

Входные потоки	кг/с	%
Полупродукт	1,000	47,94
Уголь	0,477	22,84
Силикомарганец (отходы)	0,050	2,40
Кислород	0,508	24,42
Природный газ	0,050	2,40
Расход материалов	2,085	100,00
Выходные потоки		
Металл	0,448	21,48
Шлак	0,566	27,05
Газ	1,071	51,47
Выход продуктов	2,085	100,00

зован для 1 кг марганцевой руды. Наилучшие условия для восстановления марганца соответствуют расходу угля 0,40 – 0,45 кг. При этих условиях содержание восстановленного марганца составляет 60 %, его оксида от 8 до 12 %. Газовая фаза состоит из 90 % CO, 6 % испарившегося марганца и 4 % водорода. Восстановление возможно при большом (порядка 10 – 12 %) избытке углерода в системе.

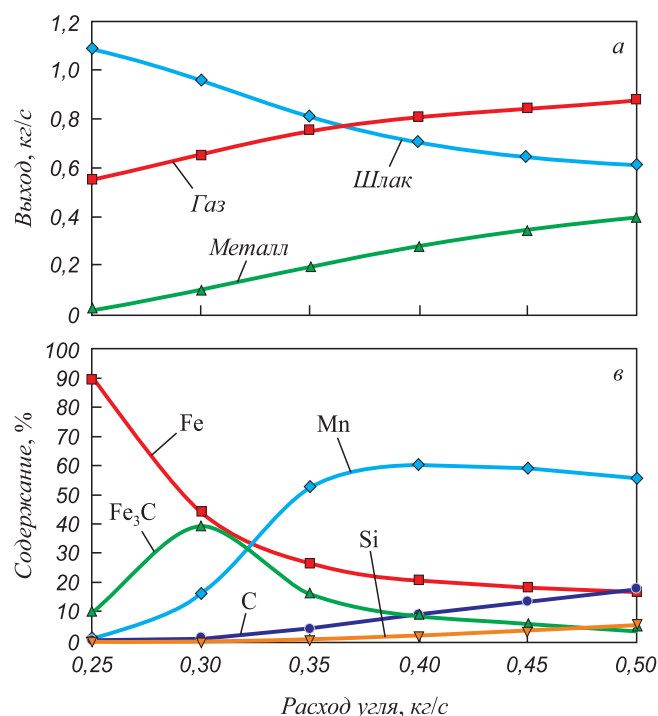


Рис. 3. Зависимости параметров процесса восстановления марганца из усинской марганцевой руды от расхода угля

Fig. 3. Dependences of the parameters of manganese recovery from the manganese ore of Usinskoe deposit on coal consumption

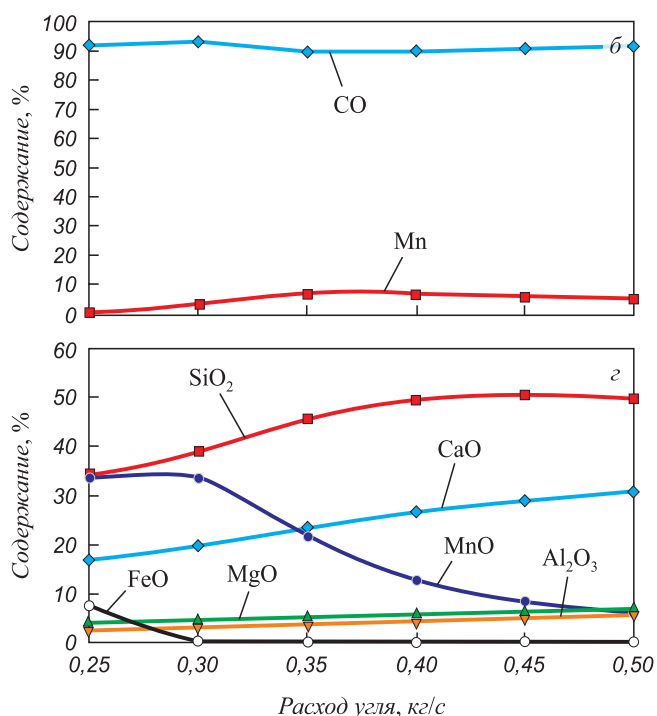
Т а б л и ц а 2

Тепловой баланс технологии переработки селезеньских руд

Table 2. Thermal balance of processing technology for the ores of Selezén'skoe deposit

Приход	кДж/с	ГДж/т
Тепло экзотермических реакций	5540,6	12,364
Тепло индуктора	1500,0	3,348
Итого	7040,6	15,712
Расход		
Тепло металла	657,9	1,468
Тепло шлака	620,9	1,386
Тепло газа	2645,4	5,904
Тепло энд. реакций	2516,4	5,615
Потери тепла	600,0	1,339
Итого	7040,6	15,712

Технология получения марганцевого сплава из усинской руды аналогична предыдущей технологии переработки селезеньской руды. Отличие заключается в том, что в усинской руде большинство соединений находится в виде карбонатов. Для их разложения также предлагается использовать восстановительный газ, отходящий из основного агрегата СЭР, следующего химического состава, % (по массе): CO 89,58; CO₂ 0,63; N₂ 0,76; H₂ 2,26; H₂O 6,78. Расход газа составил 1,099 кг/с.



После предварительного восстановления получается полупродукт, который затем поступает для окончательной переработки в основной агрегат СЭР. Расход карбонатной руды для получения 1 кг полупродукта составил 1,406 кг/с. Материальный и тепловой балансы для этого процесса приведены в табл. 3, 4. Конечный продукт имеет следующий состав, % (по массе): Fe 18,33; C 3,00; Mn 77,47; Si 1,16.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ

Результаты расчета технологии с предварительным обжигом также показали значительное улучшение тех-

нико-экономических показателей по сравнению с безобжиговой технологией: увеличение производительности на 0,12 кг/с, снижение удельных расходов угля и кислорода в два раза, уменьшение энергоемкости процесса почти в два раза (табл. 5).

Сравнительный анализ энергоемкости технологий переработки марганцевых руд в агрегате СЭР с традиционной технологией в руднотермической печи [3] представлен в табл. 6.

Выводы

Предложенная технология переработки марганцевых руд в агрегате типа СЭР с замкнутым циклом позволяет значительно снизить удельные расходы материалов, по-

Т а б л и ц а 3

Материальный баланс технологии переработки усинских руд

Table 3. Material balance of processing technology for the ores of Usinskoe deposit

Входные потоки	кг/с	%
Полупродукт	1,000	43,37
Уголь	0,531	23,03
Силикомарганец (отходы)	0,050	2,17
Известь	0,098	4,25
Кислород	0,577	25,03
Природный газ	0,050	2,17
Расход материалов	2,306	100,00
Выходные потоки		
Металл	0,365	15,83
Шлак	0,770	33,39
Газ	1,171	50,78
Выход продуктов	2,306	100,00

Т а б л и ц а 4

Тепловой баланс технологии переработки усинских руд

Table 4. Thermal balance of processing technology for the ores of Usinskoe deposit

Приход	кДж/с	ГДж/т
Тепло экзотермических реакций	5412,4	14,823
Тепло индуктора	1500,0	4,108
Итого	6912,4	18,931
Расход		
Тепло металла	545,2	1,493
Тепло шлака	902,1	2,471
Тепло газа	2728,3	7,472
Тепло энд. реакций	2136,8	5,852
Потери тепла	600,0	1,643
Итого	6912,4	18,931

Т а б л и ц а 5

Сравнительный анализ показателей технологии переработки марганцевых руд Селезенского и Усинского месторождений

Table 5. Comparative analysis of processing technology indicators of manganese ores of Selezenskoe and Usinskoe deposits

Показатель	Селезенская руда		Усинская руда	
	С предварительным восстановлением	Без предварительного восстановления	С предварительным обжигом	Без предварительного обжига
Марганцевая руда, кг/т	2811,12	2969,04	3850,7	4062,20
Уголь, кг/т	1063,42	2917,22	1363,82	2488,80
Силикомарганец (отходы), кг/т	111,55	148,45	136,94	203,10
Кислород, м³/т	793,80	2184,30	1035,1	2012,60
Природный газ, м³/т	151,99	202,27	186,58	276,70
Производительность, кг/с	0,45	0,34	0,37	0,25
Энергоемкость, ГДж/т	43,10	97,60	54,60	94,10
Содержание марганца, %	66,17	66,00	77,47	72,15

Сравнительный анализ разработанной и традиционной технологий переработки марганцевых руд

Table 6. Comparative analysis of the developed and traditional technologies for manganese ores processing

Технологии	Энергозатраты, ГДж/т металла			
	Обжиг	Агломерация	Плавка	Итого
Традиционная технология				
Плавка в руднотермической печи (карбонатный концентрат – 28,7 % Mn)	5,1	13,4	72,0	90,5
Технологии на основе агрегата типа СЭР				
Сырая усинская карбонатная руда (19 % Mn)	Энергия отх. газов	–	54,6	54,6
Мелкофракционная обогащенная селезеньская руда (24 % Mn)	Энергия отх. газов	–	43,1	43,1

высить производительность и значительно уменьшить энергоёмкость процесса по сравнению с технологией переработки бедных марганцевых руд без предварительного восстановления и обжига. Наблюдается значитель-

ное преимущество по энергозатратам предложенной технологии переработки марганцевых руд в агрегате СЭР по сравнению с традиционной технологией выплавки ферромарганца в руднотермической печи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

- Смирнов Л.А., Тигунов Л.П. Марганец в своем отечестве // Металлы Евразии. 1999. № 6. С. 20–23.
- Емлин Б.И., Гасик М.И. Справочник по электротермическим процессам. М.: Metallurgy, 1978. 288 с.
- Толстогузов Н.В. Теоретические основы и технология плавки кремнистых и марганцевых сплавов. М.: Metallurgy, 1992. 239 с.
- Дедов П.И., Свитов В.С. Обогащительная фабрика карбонатных марганцевых руд. Свердловск: изд. Уралмеханобр, 2004. 400 с.
- Нохрина О.И., Рожихина И.Д., Прошунин И.Е. Получение высококачественных концентратов при обогащении марганцевых руд. Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2019. 182 с.
- Литвинцева Э.Г., Тигунов Л.П., Броницкая 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. Красноярск: КНИИГиМС, 2001. С. 138–143.
- 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. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.380-384.4431>
- Wang Z., Yang D., Yang K., Guo L., Tan J. A green enriching process of Mn from low grade ore of manganese carbonate // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 644-650. P. 5427–5430. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.644-650.5427>
- Цымбал В.П., Кожмяченко В.И., Рыбенко И.А., Падалко А.Г. Оленников А.А. Использование принципов самоорганизации и диссипативных структур при создании нового струйно-эмульсионного металлургического процесса // Известия вузов. Черная металлургия. 2015. Т. 45. № 8. С. 572–577. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2015-8-572-577>
- Tsymbal V.P., Kozhemyachenko V.I., Rybenko I.A., Mochalov S.P., Padalko A.G., Kalashnikov S.N., Krasnoperov S.Yu., Ermakova L.A., Olennikov A.A. Background and principles of self-organizing jet-emulsion metallurgical unit // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 150. Article 012018. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/150/1/012018>
- Рыбенко И.А. Оптимизация технологий в струйно-эмульсионном металлургическом агрегате с использованием методики и инструментальной системы моделирования // Черная металлургия. 2015. Т. 45. № 8. С. 572–577.
- Смирнов Л.А., Тигунов Л.П. Мanganese in his fatherland. *Metally Evrazii*. 1999, no. 6, pp. 20–23. (In Russ.).
- Emlin B.I., Gasik M.I. *Handbook of Electrothermal Processes*. Moscow: Metallurgiya, 1978, 288 p. (In Russ.).
- Tolstoguzov N.V. *Theoretical Foundations and Technology of Melting of Siliceous and Manganese Alloys*. Moscow: Metallurgiya, 1992, 239 p. (In Russ.).
- Dedov P.I., Svitov V.S. *Processing Plant of Carbonate Manganese Ores*. Sverdlovsk: izd. Uralmexanobr, 2004, 400 p. (In Russ.).
- Nokhrina O.I., Rozhikhina I.D., Proshunin I.E. *Obtaining High-Quality Concentrates during Manganese Ores Dressing*. Novokuznetsk: izd. SibSIU, 2019, 182 p. (In Russ.).
- Litvintseva E.G., Tiginov L.P., Bronitskaya E.S., etc. Development of effective methods of dressing and processing of oxidized and carbonate ores from Russian manganese deposits. In: *State of Russian Manganese Ore Base and Issues of Providing the Industry with Manganese*. Krasnoyarsk: KNIIGiMS, 2001, pp. 138–143. (In Russ.).
- 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. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.380-384.4431>
- Wang Z., Yang D., Yang K., Guo L., Tan J. A green enriching process of Mn from low grade ore of manganese carbonate. *Applied Mechanics and Materials*. 2014, vol. 644-650, pp. 5427–5430. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.644-650.5427>
- Tsymbal V.P., Kozhemyachenko V.I., Rybenko I.A., Padalko A.G. Olennikov A.A. Usage of the principles of self-organization and dissipative structures in a new jet-emulsion metallurgical process. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2015, vol. 45, no. 8, pp. 572–577. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2015-8-572-577>
- Tsymbal V.P., Kozhemyachenko V.I., Rybenko I.A., Mochalov S.P., Padalko A.G., Kalashnikov S.N., Krasnoperov S.Yu., Ermakova L.A., Olennikov A.A. Background and principles of self-organizing jet-emulsion metallurgical unit. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016, vol. 150, article 012018. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/150/1/012018>
- Rybenko I.A. The optimization of the technologies in the jetemulsion metallurgical plant with the use of the methodology and instrumented system of the simulation. *Ferrous Metallurgy. Bulletin*

- гия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2017. № 3. С. 60–66.
12. Рыбенко И.А. Развитие теоретических основ и разработка ресурсосберегающих технологий прямого восстановления металлов с использованием метода и инструментальной системы моделирования и оптимизации: автореф. дис. ... докт. техн. наук: спец. 05.16.02. Новокузнецк, 2018. 40 с.
 13. Nicolis G., Prigogine I. *Self-Organization in Non-Equilibrium Systems*. New York: Wiley, 1977. 491 p.
 14. Haken H. *Synergetics. An Introduction*. Berlin: Springer-Verlag, 1978. 351 p.
 15. Prigogine I., Stengers I., Toffler A. *Order Out of Chaos. Man's New Dialogue with Nature*. London: Heinemann, 1984.
 16. Kondepudi D., Prigogine I. *Modern Thermodynamics*. John Wiley & Sons, Ltd, 2015. 523 p.
 17. Gladyshev G.P. Hierarchical thermodynamics rules the world to the extent of its applicability // *Norwegian Journal of Development of the International Science*. 2019. No. 27. P. 60–65.
 18. Pat. 5.558.695 USA. Process and unit for continuous metal refinement / V.P. Tsymbal, S.P. Mochalov, K.M. Shakirov, R.S. Aizatulov, B.A. Kustov, N.I. Mikheev, A.I. Toropov. 1995.
 19. Яшин В.Д., Колпак В.П., Дмитриенко В.И. и др. Селезенская площадь проявлений марганцевых руд и перспективы их использования на ОАО «Запсибметкомбинат». В кн.: Состояние марганцево-рудной базы России и вопросы обеспечения промышленности марганцем. Красноярск: КНИИГиМС, 2001. С. 44–45.
 12. Rybenko I.A. *Development of theoretical foundations and resource-saving technologies for direct reduction of metals using the method and instrumental system of modeling and optimization: Extended Abstract of Dr. Sci. Diss.* Novokuznetsk, 2018, 40 p. (In Russ.).
 13. Nicolis G., Prigogine I. *Self-Organization in Non-Equilibrium Systems*. New York: Wiley, 1977, 491 p.
 14. Haken H. *Synergetics. An Introduction*. Berlin: Springer-Verlag, 1978, 351 p.
 15. Prigogine I., Stengers I., Toffler A. *Order Out of Chaos. Man's New Dialogue with Nature*. London: Heinemann, 1984.
 16. Kondepudi D., Prigogine I. *Modern Thermodynamics*. John Wiley & Sons, Ltd, 2015, 523 p.
 17. Gladyshev G.P. Hierarchical thermodynamics rules the world to the extent of its applicability. *Norwegian Journal of Development of the International Science*. 2019, no. 27, pp. 60–65.
 18. Tsymbal V.P., Mochalov S.P., Shakirov K.M., Aizatulov R.S., Kustov B.A., Mikheev N.I., Toropov A.I. *Process and unit for continuous metal refinement*. Pat. USA 5.558.695. 1995.
 19. Yashin V.D., Kolpak V.P., Dmitrienko V.I., etc. Selezenskaya area of manganese ore manifestations and prospects for their use at JSC Zapsibmetkombinat. In: *State of Russian Manganese Ore Base of Russia and Issues of Providing the Industry with Manganese*. Krasnoyarsk: KNIIGiMS, 2001, pp. 44–45. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Инна Анатольевна Рыбенко, д.т.н, профессор, заведующий кафедрой прикладных информационных технологий и программирования, Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0003-1679-0839
E-mail: rybenkoi@mail.ru

Флориан Конголи, доктор философии, президент, FLOGEN Technologies Inc.
E-mail: fkongoli@icloud.com

Inna A. Rybenko, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Chair of Applied Information Technology and Programming, Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0003-1679-0839
E-mail: rybenkoi@mail.ru

Florian Kongoli, Doctor of Philosophy, President, FLOGEN Technologies Inc.
E-mail: fkongoli@icloud.com

Поступила в редакцию 29.11.2021
 После доработки 03.12.2021
 Принята к публикации 18.04.2022

Received 29.11.2021
 Revised 03.12.2021
 Accepted 18.04.2022