



Оригинальная статья

УДК 669.127.44:544.32

DOI 10.17073/0368-0797-2022-1-66-72



О ВОССТАНОВЛЕНИИ ЖЕЛЕЗА ИЗ МАГНЕТИТА ГАЗООБРАЗНЫМИ ВОССТАНОВИТЕЛЯМИ

В. И. Бердников¹, Ю. А. Гудим²

¹ ООО Промышленная компания «Технология металлов» (Россия, 454018, Челябинск, ул. Косарева, 63, офис 486)

² Южно-Уральский государственный университет (Россия, 454080, Челябинск, пр. Ленина, 76)

Аннотация. Химический процесс восстановления железа из магнетита посредством газообразных восстановителей является основой технологии Мидрекс, внедренной на Оскольском электрометаллургическом комбинате (ОЭМК). Данный процесс в представленной работе смоделирован с помощью программного комплекса Терра, разработанного в МГТУ им. Н.Э. Баумана. В ходе моделирования проведен анализ термодинамической системы Fe–C–O–H при постоянной температуре (900 °C) и давлении газа (0,2026 МПа). В качестве восстановителей принимались смеси монооксида углерода и водорода в разных соотношениях, а также отдельные компоненты природных углеводородных газов. Химические составы восстановителей оценивали брутто-формулой $C_pO_rH_q$, где p , r и q – стехиометрические коэффициенты. Результатами расчетов были расходы восстановительного газа m , необходимые для полного восстановления железа из магнетита, что соответствовало степени металлизации железа $\varphi = 1$. В дальнейшем величины m использовали для оценки восстановительных способностей различных газовых смесей, а величины φm – для определения потребных расходов этих смесей на восстановление железа. Последующий анализ показал, что машинный расчет величины m может быть с высокой точностью (до 0,001) аппроксимирован формулой $m = \frac{1}{\frac{p}{m_C} + \frac{r}{m_O} + \frac{q}{m_H}}$, где m_C и m_H – парциальные расходы углерода и водорода на восстановление железа соответственно,

а m_O – парциальный расход кислорода на окисление железа. Установлено также, что параметры m_C и m_H зависят от температуры процесса и являются взаимосвязанными в соответствии с уравнением $\frac{K}{2 + \frac{m_O}{m_C}} - \frac{1}{1 + \frac{2m_O}{m_H}} = K - 1$, где K – константа химического равновесия реакции

водяного газа $CO + H_2O = CO_2 + H_2$, одновременно протекающей в газовой фазе. Параметр m_O фактически является константой, не зависящей от температуры и численно равной значению $(-4/3)$ моля на 1 моль железа. Аргументами парциальных расходов могут быть также характерные молекулярные соединения, сопровождаемые соответствующими стехиометрическими коэффициентами. В практике ОЭМК принят учет расхода природного газа V , измеряемый в кубических метрах на 1 т губчатого железа. Прогноз этой величины можно выполнять по формуле $V = \frac{22\,400m}{55,9 + 231,5\left(\frac{1}{\varphi} - 1\right)}$. В целом предложенный расчетный алгоритм химического процесса может корректно

применяться в области температур 800 – 900 °C. Возможные вариации рабочего давления газа не потребуют существенных корректив в результатах расчетов.

Ключевые слова: восстановление железа, магнетитовая руда, губчатое железо, газообразный восстановитель, химические уравнения процесса, расход восстановительного газа

Для цитирования: Бердников В.И., Гудим Ю.А. О восстановлении железа из магнетита газообразными восстановителями // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 1. С. 66–72. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-1-66-72>

Original article

ON IRON REDUCTION FROM MAGNETITE BY GASEOUS REDUCING AGENTS

V. I. Berdnikov¹, Yu. A. Gudim²

¹ LLC Industrial Company “Technology of Metals” (63 Kosareva Str., Chelyabinsk 454018, Russian Federation)

² South Ural State University (76 Lenina Ave., Chelyabinsk 454080, Russian Federation)

Abstract. The chemical process of iron reduction from magnetite by gaseous reducing agents is the basis of MIDREX technology implemented at the Oskol Electrometallurgical Plant (OEMK). In the paper, this process was modeled using the TERRA software package developed at the Bauman Moscow State Technical University. During the simulation, thermodynamic system Fe–C–O–H was analyzed at constant temperature (900 °C) and gas pressure (0.2026 MPa). Mixtures of carbon monoxide and hydrogen in different ratios, as well as individual components of natural hydrocarbon gases, were used as reducing agents. The chemical compositions of reducing agents were estimated by the gross formula $C_pO_rH_q$, where p , r and q

are stoichiometric coefficients. The results of the calculations were the expenses of the reducing gas m , necessary for the complete iron reduction from magnetite, which corresponded to the degree of iron metallization $\varphi = 1$. In the future, the values m were used to evaluate the reducing abilities of various gas mixtures, and the values of φm – to determine the required expenses of these mixtures for iron reduction. Subsequent analysis showed that the machine calculation of the value m can be approximated with a small error (up to 0.001) by the formula $m = \frac{1}{\frac{p}{m_C} + \frac{r}{m_O} + \frac{q}{m_H}}$, where m_C and m_H

are the partial costs of carbon and hydrogen for iron reduction, respectively, and m_O is the partial oxygen consumption for iron oxidation. It was also established that the parameters of m_C and m_H depend on the process temperature and are interrelated in accordance with the equation $\frac{K}{2 + \frac{m_O}{m_C}} - \frac{1}{1 + \frac{2m_O}{m_H}} = K - 1$, where K is the chemical equilibrium constant of the “water gas reaction” $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} = \text{CO}_2 + \text{H}_2$, simultaneously occurring

in the gas phase. The m_O parameter is actually a constant independent of temperature and numerically equal to the value of $(-4/3)$ moles per 1 mole of iron. The arguments of partial costs can also be characteristic molecular compounds accompanied with appropriate stoichiometric coefficients. In the practice of OEMK, natural gas consumption V is taken into account, measured in cubic meters per ton of sponge iron. The forecast of this value can be performed using the formula: $V = \frac{22\,400m}{55,9 + 231,5\left(\frac{1}{\varphi} - 1\right)}$. In general, the proposed calculation algorithm of the chemical process can be

correctly applied in the temperature range of 800 – 900 °C. Possible variations in the gas working pressure will not require significant adjustments in the calculation results.

Keywords: iron reduction, magnetite ore, sponge iron, gaseous reducing agent, chemical equations, reduction gas consumption

For citation: Berdnikov V.I., Gudim Yu.A. On iron reduction from magnetite by gaseous reducing agents. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 1, pp. 66–72. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-1-66-72>

ВВЕДЕНИЕ

Восстановление железа из рудного сырья с помощью газообразных восстановителей является одним из методов так называемой «бескоксовой» или «внедоменной» металлургии [1 – 6]. В России подобная технология, известная как «Мидрекс-процесс»^{1, 2} [7, 8], реализована поэтапно, начиная с 1983 г., на Оскольском электрометаллургическом комбинате (ОЭМК). В данной работе обсуждается расчетный метод, позволяющий прогнозировать результаты работы по этой технологии.

ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫЕ ГАЗЫ

В качестве восстановительного газа в Мидрекс-процессе служит синтез-газ, полученный путем конверсии или частичного окисления природного газа. Основные компоненты такого газа – монооксид углерода CO и водород H₂. В строках 1 – 7 табл. 1 приведены возможные составы таких смесей с различными соотношениями указанных компонентов. В практике ОЭМК используются смеси с мольными соотношениями CO/H₂, близкими к 1/2 (строка 3, табл. 1). Обобщенная brutto-формула всех подобных составов газа – C_pO_rH_q, где p , r , q – стехиометрические коэффициенты.

Проведен анализ возможности замены искусственно созданных газовых смесей «сырыми» природными углеводородными газами типа C_pH_q [9]. В строках 8 – 15 табл. 1 указаны газы с параметрами $p = 1 \div 4$ и $q = 2p$ или $q = 2p + 2$. Другие такие газы с параметра-

Таблица 1

Расчет расхода восстановительных газов ($t = 900$ °C, $P = 0,2026$ МПа)

Table 1. Calculation of the reduction gases consumption
($t = 900$ °C, $P = 0.2026$ MPa)

Номер	Газ	Параметр			Расход газа m , моли	
		p	r	q	по [12]	по (3)
1	2	3	4	5	6	7
	Система I: $\frac{1}{3}\text{Fe}_3\text{O}_4 - p\text{C} - r\text{O} - q\text{H}$					
1	CO	1	1	0	3,408	3,408
2	CO(H ₂) ₃	1	1	6	0,766	0,766
3	CO(H ₂) ₂	1	1	4	1,033	1,032
4	COH ₂	1	1	2	1,586	1,585
5	(CO) ₂ H ₂	2	2	2	1,082	1,082
6	(CO) ₃ H ₂	3	3	2	0,820	0,821
7	H ₂	0	0	2	2,962	2,962
	Система II: $\frac{1}{3}\text{Fe}_3\text{O}_4 - p\text{C} - q\text{H}$					
8	Метилен CH ₂	1	0	2	0,724	0,724
9	Метан CH ₄	1	0	4	0,582	0,582
10	Этилен C ₂ H ₄	2	0	4	0,362	0,362
11	Этан C ₂ H ₆	2	0	6	0,322	0,323
12	Пропилен C ₃ H ₆	3	0	6	0,240	0,241
13	Пропан C ₃ H ₈	3	0	8	0,222	0,223
14	Бутадиен C ₄ H ₈	4	0	8	0,180	0,181
15	Бутан C ₄ H ₁₀	4	0	10	0,170	0,171

¹ DRI production. URL: <https://www.metallics.org/dri-production.html>

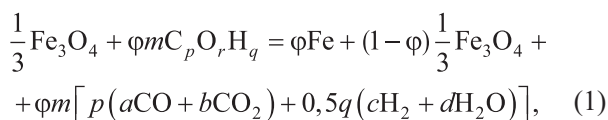
² Процесс Мидрекс: производство губчатого железа. URL: <https://uas.su/books/srmp/511/razdel511.php>

ми $p > 4$ или $q = 2p + 1$ здесь не рассматриваются, но на них также распространяются закономерности, установленные ниже.

ПРОЦЕСС ВОССТАНОВЛЕНИЯ

Восстановление железа в Мидрекс-процессе осуществляется подобно доменному процессу, т. е. в реакторе шахтного типа и режиме противотока восстановительного газа с нисходящей рудной шихтой (магнетитовые окатыши). Средняя температура шихты в реакционной зоне принимается в расчетах $t = 900$ °С, а давление газа в ней $P = 0,2026$ МПа (2 атм). Регламентируемая степень металлизации окатышей ϕ составляет 0,80 – 0,95 (в долях от единицы). В этом случае рабочий расход газа на восстановление окатышей составит величину ϕm , где m – расход газа, необходимый для полного восстановления железа из магнетита (при $\phi = 1$). Далее характеристику m будем также использовать для сравнения восстановительных способностей различных газовых смесей.

В целом химический процесс восстановления одного моля железа из магнетита по данной технологии можно описать балансовым уравнением



где a , b , c и d – стехиометрические коэффициенты. Физический смысл и количественная оценка их обсуждаются ниже.

Температурная область корректного применения уравнения (1) – 800 ÷ 900 °С. При $t < 800$ °С в газовой фазе дополнительно и в заметном количестве образуется метан CH_4 [10]. А при температуре $t = 910$ °С происходит твердофазная реакция невариантного типа $\text{Fe} + \text{Fe}_3\text{O}_4 = 4\text{FeO}$, в результате которой часть ранее восстановленного железа вновь окисляется с образованием вюститита [11].

Химический процесс восстановления железа по уравнению (1) моделировался посредством программного комплекса Терра [12], база данных которого разрабатывалась и периодически обновлялась на основании данных работы [13]. В ходе моделирования при каждом заданном массовом составе магнетита и восстановителя, а также при заданной температуре и давлении газа определялись равновесные концентрации компонентов газовой и конденсированных фаз. Установленные таким образом потребные расходы восстановительного газа m приведены в колонке 6 табл. 1.

РАСХОД ВОССТАНОВИТЕЛЬНОГО ГАЗА

Предварительный анализ показал, что полный расход восстановительного газа m нельзя представить ад-

дитивной суммой парциальных (поэлементных) расходов газа m_C , m_O и m_H , т. е. в согласии с формулой $m = pm_C + rm_O + qm_H$. Однако это возможно при замене всех расходных характеристик процесса их обратными величинами, т. е. выполнение необходимых расчетов по формуле $\frac{1}{m} = \frac{p}{m_C} + \frac{r}{m_O} + \frac{q}{m_H}$. Отсюда следует:

$$m = \frac{1}{\frac{p}{m_C} + \frac{r}{m_O} + \frac{q}{m_H}}. \quad (2)$$

Аргументом парциальных расходов в уравнении (2) могут быть не только химические элементы, но и характерные молекулярные соединения газа. Например, в системе I табл. 1 те же значения m будут получены и при использовании парциальных расходов газа с аргументами CO и H_2 , а в системе II – с аргументами CH_2 и H_2 , характеризующими соответственно срединные и оконечные участки их молекулярных структур. Далее аргументы в молекулярной форме будем указывать в круглых скобках после символов расхода m , например, $m(\text{H}_2)$.

Такая методика расчета позволяет, прежде всего, получить недостающую информацию по парциальным характеристикам некоторых других химических компонентов газовых смесей (табл. 2). Компоненты с

Таблица 2

Расчет расхода некоторых компонентов газа
($t = 900$ °С, $P = 0,2026$ МПа)

Table 2. Calculation of some gas components consumption
($t = 900$ °С, $P = 0.2026$ MPa)

Номер	Компонент	Расчетная формула	Расход m , моли
1	C	$m_C = \frac{1}{\frac{1}{m(\text{CH}_4)} - \frac{2}{m(\text{H}_2)}}$	0,958
2	O	$m_O = \frac{1}{\frac{1}{m(\text{CO})} - \frac{1}{m_C}}$	–1,333
3	H	$m_H = \frac{1}{\frac{0,5}{m(\text{H}_2)}}$	5,924
4	CO ₂	$m(\text{CO}_2) = \frac{1}{\frac{1}{m(\text{CO})} + \frac{1}{m_O}}$	–2,190
5	O ₂	$m(\text{O}_2) = \frac{1}{\frac{2}{m_O}}$	–0,667
6	H ₂ O	$m(\text{H}_2\text{O}) = \frac{1}{\frac{1}{m(\text{H}_2)} + \frac{1}{m_O}}$	–2,425

отрицательной численной величиной параметров m_i являются окислителями в газовой смеси. Так, полученное значение величины $m_O = -1,333$ – это то количество молей кислорода, которое необходимо удалить из 1/3 моля магнетита, чтобы получить 1 моль железа.

Выражения элементарных парциальных расходов (строки 1 – 3 табл. 2) после подстановки их в формулу (2) позволяют получить простое аппроксимирующее определение полных расходов газовых смесей:

$$m = \frac{1}{\frac{p}{0,958} - \frac{r}{1,333} + \frac{q}{5,924}} = \frac{1}{1,044p - 0,750r + 0,1688q}. \quad (3)$$

Вычисленные по этой формуле значения расходов m мало отличаются от результатов точного машинного расчета их величины (колонки 7 и 6 табл. 1).

СОСТАВ ОТХОДЯЩЕГО ГАЗА

Частные случаи термодинамической системы Fe–O–C–H подробно анализировались как зарубежными авторами [14, 15], так и отечественными [16 – 18]. Однако полученной ими информации было недостаточно для прогнозирования свойств газовых смесей произвольного состава. Ниже рассматривается общий подход к решению данной проблемы.

Из балансов по содержаниям углерода и водорода согласно уравнению (1) следует: $a + b = 1$ и $c + d = 1$. При этом коэффициенты a и c численно определяют степень «недожога» монооксида углерода и водорода соответственно, а коэффициенты b и d – полноту сжигания этих компонентов до диоксида углерода и паров воды. Также очевидно, что состав отходящего газа отражает прохождение в нем реакции водяного газа $CO + H_2O = CO_2 + H_2$ [17]. Константа равновесия этой

реакции $K = \frac{ad}{bc} = \frac{a(1-c)}{(1-a)c}$. Поэтому взаимосвязь между углеродсодержащими и водородсодержащими компонентами газа будет выражаться уравнением

$$\frac{K}{a} - \frac{1}{c} = K - 1. \quad (4)$$

Численные значения параметров a , c и K при различных рабочих температурах процесса приведены в табл. 3.

Целесообразно также установить связь между основными характеристиками восстановительного и отходящего газа. Баланс по содержанию кислорода согласно уравнению (1) при $\varphi = 1$ определится выражением $\frac{4}{3} + mr = m[p(a + 2b) + 0,5qd]$. А после подстановок $\frac{4}{3} = -m_O$; $b = 1 - a$ и $d = 1 - c$, получим:

$$m = \frac{1}{\frac{p(2-a)}{-m_O} - \frac{r}{-m_O} + \frac{0,5q(1-c)}{-m_O}}. \quad \text{Сопоставляя это вы-}$$

ражение с уравнением (2) и приравнявая члены при коэффициентах p и q , получим новые определения коэффициентов a и c :

$$a = 2 + \frac{m_O}{m_C}; \quad c = 1 + \frac{2m_O}{m_H}. \quad (5)$$

Таким образом, итоговое балансовое уравнение химического процесса (1) при новых независимых переменных процесса m_C и m_H примет вид:

$$\begin{aligned} \frac{1}{3} Fe_3O_4 + \varphi m C_p O_r H_q = \varphi Fe + (1 - \varphi) \frac{1}{3} Fe_3O_4 + \\ + \varphi m \left[p \left(2 + \frac{m_O}{m_C} \right) CO - \left(1 + \frac{m_O}{m_C} \right) CO_2 + \right. \\ \left. + 0,5q \left(1 + \frac{2m_O}{m_H} \right) H_2 - \left(\frac{2m_O}{m_H} \right) H_2O \right], \quad (6) \end{aligned}$$

$$\text{где } m = \frac{1}{\frac{p}{m_C} + \frac{r}{m_O} + \frac{q}{m_H}}.$$

Новые переменные m_C и m_H также являются взаимосвязанными согласно уравнению

$$\frac{K}{2 + \frac{m_O}{m_C}} - \frac{1}{1 + \frac{2m_O}{m_H}} = K - 1. \quad (7)$$

Очевидно, что балансовое уравнение (1) может быть также записано в форме, содержащей лишь один из четырех ранее рассмотренных параметров процесса: a , c , m_C , m_H .

Таблица 3

Температурные и расходные характеристики отходящего газа

Table 3. Temperature and consumption characteristics of the waste gas

Температура t , °C	Параметры газовой фазы			Парциальные расходы газа, моли		
	a	c	K	m_C	m_O	m_H
800	0,586	0,605	0,924	0,945	–1,333	6,75
850	0,598	0,576	1,093	0,951		6,29
900	0,609	0,550	1,275	0,958		5,92
950	0,623	0,530	1,463	0,967		5,67
1000	0,636	0,513	1,660	0,977		5,47

СОСТАВ ПРОМЫШЛЕННОГО ВОССТАНОВИТЕЛЬНОГО

ГАЗА

Один из методов приготовления восстановительной газовой смеси именуется как «частичное окисление природного газа кислородом»³. Он основывается на реализации химической реакции $\text{CH}_4 + 0,5\text{O}_2 = \text{CO} + 2\text{H}_2$. Образующиеся продукты этой реакции представляют собой газовую смесь с брутто-формулой COH_4 . О калорийности такой смеси можно судить по факту, что один из ее изомеров CH_3OH известен как метиловый спирт. Расчетный расход такой смеси – $m = 1,033$ моля (строка 3 табл. 1). Однако промышленный природный газ содержит, кроме метана, также другие компоненты, что вызывает изменение расчетной величины расхода m .

В колонке 2 табл. 4 приводятся типичные содержания (в мольных долях) компонентов природного газа Оренбургского газоконденсатного месторождения⁴ и технологического кислорода в соотношении 1:0,5. Брутто-формула этой смеси $\text{C}_{1,101}\text{O}_{1,020}\text{H}_{4,093}\text{N}_{0,094}$, а расход ее согласно уравнению (3) составит

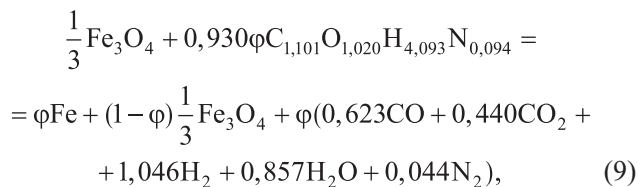
$$m = \frac{1}{1,044 \cdot 1,101 - 0,750 \cdot 1,020 + 0,1688 \cdot 4,093} = 0,930 \text{ моля.}$$

Другой способ определения расхода смеси осуществляется по формуле

$$m = \frac{1}{\frac{p_1}{m_1} + \frac{p_2}{m_2} + \frac{p_3}{m_3} + \dots}, \quad (8)$$

где m_i и p_i – парциальные расходы и мольные доли компонентов газа соответственно. Расчет по этому методу дал аналогичный результат (колонка 4 табл. 4).

Итоговое балансовое уравнение восстановления железа этой газовой смесью будет следующее:



где ϕ – заданная степень металлизации железорудных окатышей.

В производственной практике принято расходные характеристики газов выражать в объемных единицах

^{3, 5} Процесс Мидрекс: производство губчатого железа. URL: <https://uas.su/books/srmp/511/razdel511.php>

⁴ Состав и физико-химические свойства природных газов. Презентация. URL: <https://myslide.ru/presentation/skachat-sostav-i-fizikokhimicheskie-svoystva-prirodnix-gazov>

Таблица 4

Пример расчета расхода газовой смеси

Table 4. Example of calculation of the gas mixture consumption

Компонент	Параметры газовой смеси		
	p_i	m_i , моли	p_i/m_i , моли
1	2	3	4
Природный газ			
CH_4	0,840	0,582	1,443
C_2H_6	0,050	0,322	0,155
C_3H_8	0,016	0,222	0,072
C_4H_{10}	0,027	0,171	0,158
CO_2	0,005	–2,190	–0,002
H_2O	0,015	–2,425	–0,006
N_2	0,047	–	–
Σ	1	–	1,820
Технический кислород			
O_2	0,4975	–0,667	–0,746
H_2	0,0025	2,962	0,001
Σ	0,5	–	–0,745
Всего газа			
Σ	1,5	–	1,075
$1/\Sigma$	–	–	0,930

измерения, а твердых материалов – в массовых. Поэтому удельный расход восстановительного газа V , измеряемый в кубических метрах на 1 т губчатого железа, определится формулой

$$V = \frac{1000 A \phi m}{\phi M_1 + (1-\phi) M_2} = \frac{22\,400 m}{55,9 + 231,5 \left(\frac{1}{\phi - 1} \right)}, \quad (10)$$

где A – молярный объем газа, л/моль; M_1 и M_2 – молярные массы железа и магнетита, г/моль, соответственно.

Согласно уравнению (10), при $m = 0,930$ и $\phi = 0,95$ потребуется $306 \text{ м}^3/\text{т}$ восстановительного газа. Эта расчетная величина согласуется с фактической величиной суммарного расхода природного газа и технологического кислорода на ОЭМК⁵.

Выводы

Предложена методика расчета количества восстановительного газа произвольного состава, необходимого для прямого восстановления железа из магнетита в промышленном агрегате.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Князев В.Ф., Гиммельфарб А.И., Неменов А.М. Бескоксовая металлургия железа. Москва: Metallurgizdat, 1972. 272 с.
2. Развитие бескоксовой металлургии / Н.А. Тулин, В.С. Кудрявцев, С.А. Пчелкин и др. М.: Металлургия, 1987. 328 с.
3. Юсфин Ю.С., Пашков Н.Ф. Металлургия железа. Москва: ИКЦ «Академкнига», 2007. 464 с.
4. Ünal H., Turgut E., Atapek S., Alkan A. Direct reduction of ferrous oxides to form an iron-rich alternative charge material // *High Temperature Materials and Processes*. 2015. Vol. 34. No. 8. P. 751–756. <https://doi.org/10.1515/htmp-2014-0125>
5. Tanaka H. Resources trend and use of directly reduced iron in steel-making process // *R and D: Research and Development Kobe Steel Engineering Reports*. 2014. Vol. 64. No. 1. P. 2–7.
6. Direct Reduction of Iron (DRI/HBI). 2nd Edition. Moscow: AO Informine, 2018.
7. Atsushi M., Uemora H., Sakagushi T. MIDREX processes // *R and D: Research and Development Kobe Steel Engineering Reports*. 2010. Vol. 60. No. 1. P. 5–11.
8. Mouer A. Direct from Midrex. 2nd Quarter. 2009. P. 3–9.
9. Справочник химика. Том 2. Ленинград: Химия, Ленинградское отделение, 1971. 1168 с.
10. Бердников В.И., Гудим Ю.А. Химические реакции в процессах газификации углерода // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2019. Т. 62. № 9. С. 705–712. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-9-705-712>
11. Бердников В.И., Гудим Ю.А. Химические реакции при восстановлении железа из оксидов в среде монооксида углерода // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2021. Т. 64. № 3. С. 211–213. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-3-211-213>
12. Трусов Б.Г. База данных и программный комплекс ТЕРРА, редакция 6.3 (электронный ресурс). Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013.
13. Gurvich L.V., Iorish V.S., etc. *IVTANTHERMO – A thermodynamic database and software system for the personal computer*. CRC Press Inc., Boca Raton, 1993.
14. Kam E., Hughes R. A model for the direct reduction of iron ore by mixtures of hydrogen and carbon monoxide in a moving bed // *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*. 1981. Vol. 59. No. 3. P. 196–206.
15. Valipour M., Hashemi M., Saboohi Y. Mathematical modeling of the reaction in an iron ore pellet using a mixture of hydrogen, water vapor, carbon monoxide and carbon dioxide // *Advanced Powder Technology*. 2006. Vol. 17. No. 3. P. 277–295. <https://doi.org/10.1163/15685520677213375>
16. Михайлов Г.Г., Кузнецов Ю.С., Качурина О.И., Чернуха А.С. Анализ фазовых равновесий в системе «оксиды железа – углерод – CO – CO₂» // *Вестник ЮУрГУ, серия «Металлургия»*, 2013. Т. 13. № 1. С. 6–13.
17. Кузнецов Ю.С., Михайлов Г.Г., Качурина О.И. Термодинамический анализ реакции водяного газа // *Вестник ЮУрГУ, серия «Металлургия»*, 2014. Т. 14. № 1. С. 5–11.
18. Кузнецов Ю.С., Качурина О.И. Термодинамический анализ процессов восстановления оксидов железа с использованием углерода и паров воды // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2019. Т. 62. № 5. С. 394–400. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-5-394-406>
1. Knyazev V.F., Gimmel'farb A.I., Nemenov A.M. *Coke-Free Metallurgy of Iron*. Moscow: Metallurgizdat, 1972, 272 p. (In Russ.).
2. Tulin N.A., Kudryavtsev V.S., Pchelkin S.A., etc. *Development of Coke-Free Metallurgy*. Moscow: Metallugiya, 1987, 328 p. (In Russ.).
3. Yusfin Yu.S., Pashkov N.F. *Metallurgy of Iron*. Moscow: Akademkniga, 2007, 464 p. (In Russ.).
4. Ünal H., Turgut E., Atapek S., Alkan A. Direct reduction of ferrous oxides to form an iron-rich alternative charge material. *High Temperature Materials and Processes*. 2015, vol. 34, no. 8, pp. 751–756. <https://doi.org/10.1515/htmp-2014-0125>
5. Tanaka H. Resources trend and use of directly reduced iron in steel-making process. *R and D: Research and Development Kobe Steel Engineering Reports*. 2014, vol. 64, no. 1, pp. 2–7.
6. *Direct Reduction Iron (DRI/HBI)*. 2nd Edition. Moscow, AO Informine, 2018.
7. Atsushi M., Uemora H., Sakagushi T. MIDREX processes. *R and D: Research and Development Kobe Steel Engineering Reports*. 2010, vol. 60, no. 1, pp. 5–11.
8. Mouer A. *Direct from Midrex*. 2nd Quarter. 2009, pp. 3–9.
9. *Chemist's Handbook*. Vol. 2. Leningrad: Khimiya, 1971, 1168 p. (In Russ.).
10. Berdnikov V.I., Gudim Yu.A. Chemical reactions in processes of carbon gasification. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019, vol. 62, no. 9, pp. 705–712. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-9-705-712>
11. Berdnikov V.I., Gudim Yu.A. Chemical reactions during iron reduction from oxides in carbon monoxide environment. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 3, pp. 211–213. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-3-211-213>
12. Trusov B.G. *Database and Program Complex TERRA, edition 6.3* [Electronic resource]. Moscow: Bauman STU, 2013. (In Russ.).
13. Gurvich L.V., Iorish V.S., etc. *IVTANTHERMO – A Thermodynamic Database and Software System for the Personal Computer. User's Guide*. Boca Raton: CRC Press, Inc., 1993.
14. Kam E., Hughes R. A model for the direct reduction of iron ore by mixtures of hydrogen and carbon monoxide in a moving bed. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*. 1981, vol. 59, no. 3, pp. 196–206.
15. Valipour M., Hashemi M., Saboohi Y. Mathematical modeling of the reaction in an iron ore pellet using a mixture of hydrogen, water vapor, carbon monoxide and carbon dioxide. *Advanced Powder Technology*. 2006, vol. 17, no. 3, pp. 277–295. <https://doi.org/10.1163/15685520677213375>
16. Mikhailov G.G., Kuznetsov Yu.S., Kachurina O.I., Chernukha A.S. Analysis of phase equilibria in the system “iron oxides – carbon – CO – CO₂”. *Vestnik YuUrGU, seriya Metallurgiya*. 2013, vol. 13, no. 1, pp. 6–13. (In Russ.).
17. Kuznetsov Yu.S., Mikhailov G.G., Kachurina O.I. Thermodynamic analysis of water gas reaction. *Vestnik YuUrGU, seriya Metallurgiya*. 2014, vol. 14, no. 1, pp. 5–11. (In Russ.).
18. Kuznetsov Yu.S., Kachurina O.I. Thermodynamic analysis of iron oxides reduction using carbon and water vapour. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019, vol. 62, no. 5, pp. 394–400. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-5-394-406>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Виктор Иванович Бердников, к.т.н., доцент, старший научный сотрудник, ООО Промышленная компания «Технология металлов»

E-mail: berdnikov-chel@mail.ru

Юрий Александрович Гудим, д.т.н., профессор, Южно-Уральский государственный университет

Viktor I. Berdnikov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Senior Researcher, LLC Industrial Company "Technology of Metals"

E-mail: berdnikov-chel@mail.ru

Yurii A. Gudim, Dr. Sci. (Eng.), Prof., South Ural State University

Поступила в редакцию 13.08.2021

После доработки 09.09.2021

Принята к публикации 25.11.2021

Received 13.08.2021

Revised 09.09.2021

Accepted 25.11.2021