



Краткое сообщение

УДК 544.32

DOI 10.17073/0368-0797-2021-5-360-362



## К ТЕРМОДИНАМИКЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗА ИЗ ОКСИДОВ

В. И. Бердников<sup>1</sup>, Ю. А. Гудим<sup>2</sup>

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

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

**Аннотация.** Выполнено компьютерное моделирование химического процесса прямого восстановления железа в агрегатах, работающих по технологии «Мидрекс». Проведен анализ четырех вариантов такой технологии, различающихся типом исходного сырья и температурой рабочего процесса. Установлено, что при повышении температуры процесса снижается потребный расход природного газа и полностью устраняется метан в отходящем газе. Также отмечено, что при постоянной температуре процесса концентрации всех компонентов системы находятся в линейной зависимости от величины расхода восстановительного газа. Это обстоятельство позволило записать единое балансовое уравнение для всех вариантов изучаемого химического процесса.

**Ключевые слова:** химические реакции, оксиды железа, термодинамическая система, моделирование процесса, прямое восстановление железа, Мидрекс-процесс

**Для цитирования:** Бердников В.И., Гудим Ю.А. К термодинамике восстановления железа из оксидов // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 5. С. 360–362. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-5-360-362>

Short report

## ON THERMODYNAMICS OF IRON REDUCTION FROM OXIDES

V. I. Berdnikov<sup>1</sup>, Yu. A. Gudim<sup>2</sup>

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

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

**Abstract.** A computer simulation of the chemical process of direct iron reduction in aggregates was performed with the use of MIDREX technology. The analysis of four variants of this technology, which differ in the type of raw material and temperature of the working process, was carried out. It was determined that when the process temperature increased, the required consumption of natural gas decreased, and methane in the waste gas was completely eliminated. It was also noted that at a constant process temperature, the concentrations of all components of the system were linearly dependent on flow rate of the reducing gas. This circumstance allowed us to write a single balance equation for all variants of the studied chemical process.

**Keywords:** chemical reactions, iron oxides, thermodynamic system, process modeling, direct reduction of iron, MIDREX process

**For citation:** Berdnikov V.I., Gudim Yu.A. On thermodynamics of iron reduction from oxides. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 5, pp. 360–362. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-5-360-362>

При прямом восстановлении железа из рудного сырья обычно получают полупродукт, содержащий 80–95 % металлургического (губчатого) железа, с целью последующего передела его в доменных или сталеплавильных печах. В мире около 70 % такого железа производится по технологии «Мидрекс» [1–3]. В России она, начиная с 1983 г., поэтапно внедрялась на Оскольском электрометаллургическом комбинате (ОЭМК) [4].

В данном процессе железорудные окатыши обрабатываются в среде восстановительного газа, состояще-

го примерно на одну треть из оксида углерода и на две трети из водорода. Поэтому химический состав такого газа можно условно представлять формулами  $\text{CO}(\text{H}_2)_2$  или  $\text{OCH}_4$ . Раньше этот газ получали посредством углекислотно-паровой конверсии природного газа, а позже – путем частичного сжигания природного газа кислородом [4].

Химический процесс восстановления железа по этой технологии моделировали с использованием программного комплекса Терра [5]. Анализировали тер-

Параметры химического процесса металлизации железа

Parameters of the chemical process of iron metallization

Номер варианта	Оксид	t, °C	Расход восстановителя, моли		Температурные параметры		
			n <sub>0</sub>	n <sub>1</sub>	η <sub>C</sub>	η <sub>CH</sub>	η <sub>H</sub>
1	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	750	0,148	1,336	0,564	0,015	0,627
2		900	0,129	1,162	0,609	0	0,550
3	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	750	0	1,187	0,564	0,015	0,627
4		900	0	1,033	0,609	0	0,550

модинамическую систему Fe–O–C–H, содержащую 1 моль железа. При этом вводятся следующие ограничения методики расчетов:

– перерабатываемые железные руды (гематит, магнетит) представлялись в форме беспримесных оксидов (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>);

– температуры шихты в реакционной зоне принимались равными 750 °C (в агрегатах ранних типов) и 900 °C (в современных агрегатах);

– давление газа в реакционной зоне принималось равным его максимальной величине 0,2026 МПа (2 атм), при минимальном давлении газа (1,3 атм) расчетные показатели процесса изменялись менее, чем на 1 %;

– процессы переработки оценивались балансовыми уравнениями типа <оксид> + nCO(H<sub>2</sub>)<sub>2</sub> = <продукты реакции>, где n – расход восстановителя.

Далее принималось: n<sub>0</sub> – расход восстановителя в начале процесса металлизации и n<sub>1</sub> – при теоретически достижимой 100 %-ной металлизации железа. Численные значения этих величин для четырех вариантов переработки сырья приведены в таблице. Очевидно, что при переработке магнетита металлизация начинается сразу после ввода восстановителя, а при переработке гематита – при расходах газа n<sub>0</sub> =  $\frac{n_1}{9}$  моля, поскольку при меньших расходах (n < n<sub>0</sub> моля) проходит другой процесс: Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> → Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>.

Расчетами установлено, что мольные доли восстановленного железа m во всех вариантах технологии с точностью до 0,001 находятся в линейных зависимостях от расходов восстановителя n по формулам  $m = \frac{n - n_0}{n_1 - n_0}$ . Это позволило записать единое балансовое уравнение процесса переработки:

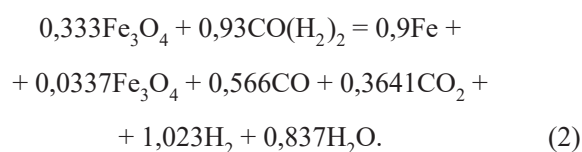
$$(0,5\text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ или } 0,333\text{Fe}_3\text{O}_4) + n\text{CO}(\text{H}_2)_2 = m\text{Fe} + 0,333(1 - m)\text{Fe}_3\text{O}_4 + n[\eta_C\text{CO} + (1 - \eta_C - \eta_{\text{CH}})\text{CO}_2 + \eta_{\text{CH}}\text{CH}_4 + 2\eta_H\text{H}_2 + 2(1 - \eta_H - \eta_{\text{CH}})\text{H}_2\text{O}], \quad (1)$$

где η<sub>C</sub>, η<sub>CH</sub> и η<sub>H</sub> – температурно-зависимые характеристики «недожога» оксида углерода, метана и водорода соответственно. Формальные определения этих параметров:  $\eta_C = \frac{\text{CO}}{\text{CO} + \text{CO}_2 + \text{CH}_4}$ , η<sub>CH</sub> = const

и  $\eta_H = \frac{\text{H}_2}{\text{H}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{CH}_4}$ . Численные значения параметров указаны в таблице.

Таким образом, для достижения заданной степени металлизации железа m при переработке гематита и магнетита потребуются расходы восстановителя:  $n = m(n_1 - n_0) + n_0 = 0,889mn_1 + 0,111$  и  $n = mn_1$  моля соответственно.

На ОЭМК в настоящее время используется технология с параметрами, близкими к варианту 4 таблицы. Поэтому при средней величине металлизации железа 90 % (m = 0,9 моля) расход восстановителя составит n = 0,93 моля. Балансовое уравнение такого процесса будет иметь вид:



Для переработки магнетита, имеющего молекулярную массу 232 г/моль, потребуется удельный расход природного газа  $\frac{0,93 \cdot 22,4 \cdot 10^3}{0,333 \cdot 232} = 269 \text{ м}^3$  на 1 т окатышей, что подтверждается опытом работы ОЭМК [4].

**Выводы**

Для описания химического процесса восстановления железа предложено балансовое уравнение этого процесса, устанавливающего связь количества восстановленного железа и состава образующегося колошникового газа от величины расхода восстановительного газа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. 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>
  2. Atsushi M., Uemura H., Sakaguchi T. MIDREX processes // *Kobelco Technology Review*. 2010. No. 29. P. 50–57.
  3. Mouer A. Direct from MIDREX. 2<sup>nd</sup> Quarter. 2009. P. 3–9.
  4. Процесс Мидрекс: производство губчатого железа. Электронный ресурс. URL: <https://uas.su/books/srmp/511/razdel511.php>
  5. Трусов Б.Г. База данных и программный комплекс ТЕРРА, редакция 6.3 (электронный ресурс). М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013.
1. 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>
  2. Atsushi M., Uemura H., Sakaguchi T. MIDREX processes. *Kobelco Technology Review*. 2010, no. 29, pp. 50–57.
  3. Mouer A. *Direct from MIDREX*. 2<sup>nd</sup> Quarter. 2009, pp. 3–9.
  4. *MIDREX Process: Sponge Iron Production. Information Service*. Available at URL: <https://uas.su/books/srmp/511/razdel511.php>
  5. Trusov B.G. *Database and Program Complex TERRA*, edition 6.3 [Electronic resource]. Moscow: Bauman STU, 2013. (In Russ.).

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](mailto: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](mailto:berdnikov-chel@mail.ru)

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

Поступила в редакцию 17.12.2020  
После доработки 17.12.2020  
Принята к публикации 16.04.2021

Received 17.12.2020  
Revised 17.12.2020  
Accepted 16.04.2021