



Оригинальная статья

УДК 669.046

DOI 10.17073/0368-0797-2021-10-728-735



## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗА ИЗ КОНЦЕНТРАТОВ ГИДРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОГАЩЕНИЯ

И. А. Рыбенко<sup>1</sup>, О. И. Нохрина<sup>1</sup>, И. Д. Рожихина<sup>1</sup>,

М. А. Голодова<sup>1</sup>, И. Е. Ходосов<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> ЗАО «Север Минералс» (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, пр. Ермакова, 9А)

**Аннотация.** Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований процессов твердофазного восстановления железа из железосодержащего концентрата, полученного в результате гидрометаллургического обогащения железомарганцевых и полиметаллических марганецсодержащих руд, углями марок Д (длиннопламенный) и 2Б (бурый). Методом термодинамического моделирования с использованием программного комплекса «Терра» проведено исследование восстановительных свойств углей путем расчетов равновесных составов в диапазоне температур 373 – 1873 К. Получены зависимости составов и объема газовой фазы, образующейся в результате выделения летучих компонентов в процессе нагрева, от температуры для углей рассматриваемых марок. В результате термодинамического моделирования определены оптимальные температуры и расходы углей, обеспечивающие полное восстановление железа из железосодержащего концентрата. Результаты экспериментальных исследований были получены с использованием современных методов исследований с применением лабораторного и аналитического оборудования, а также методов статистической обработки результатов. Результаты анализа углей, проведенного с помощью термического анализатора Setaram LabSys Evo, показали, что процесс термического разложения углей исследуемых марок протекает согласно общим закономерностям. Процесс термического разложения длиннопламенного угля протекает менее интенсивно, чем бурого. Результаты экспериментального изучения процессов термического разложения восстановителей показали, что объемы газовых фаз, образующихся при нагреве углей до температуры 1173 К в атмосфере аргона, практически совпадают с расчетными значениями. В результате термодинамического моделирования и экспериментального изучения процесса восстановления железа из железного концентрата определены оптимальные расходы углей марок Д и 2Б при температуре 1473 К. Наилучшим восстановителем с минимальным удельным расходом является уголь длиннопламенный марки Д. При определении оптимального количества восстановителя в шихтовых смесях при изучении процессов металлизации установлено, что при избытке восстановителя можно достичь практически полного извлечения (98 – 99 %) железа из концентрата.

**Ключевые слова:** термодинамическое моделирование, железосодержащий концентрат, длиннопламенный уголь, бурый уголь, восстановление железа

**Финансирование:** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Субъекта РФ (Кемеровская обл. – Кузбасс) в рамках научного проекта № 20-48-420001/21.

**Для цитирования:** Рыбенко И.А., Нохрина О.И., Рожихина И.Д., Голодова М.А., Ходосов И.Е. Исследование процесса восстановления железа из концентратов гидрометаллургического обогащения // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 10. С. 728–735.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-10-728-735>

Original article

## IRON REDUCTION FROM CONCENTRATES OF HYDROMETALLURGICAL DRESSING

I. A. Rybenko<sup>1</sup>, O. I. Nokhrina<sup>1</sup>, I. D. Rozhikhina<sup>1</sup>,

M. A. Golodova<sup>1</sup>, I. E. Khodosov<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> CJSC “Sever Minerals” (9A Ermakova Ave., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)

**Abstract.** The article presents results of theoretical and experimental studies of the processes of iron solid-phase reduction from an iron-containing concentrate obtained as a result of hydrometallurgical dressing of ferromanganese and polymetallic manganese-containing ores with coals of grades D (long-flame) and 2B (brown). The method of thermodynamic modeling using TERRA software complex was used to study the reducing properties of hydrocarbons by calculating equilibrium compositions in the temperature range of 373 – 1873 K. The authors obtained the dependences of compositions and volume of the gas phase formed as a result of the release of volatile components during heating on the temperature for the coals of the grades under consideration. As a result of thermodynamic modeling, the optimal temperatures and consumption are determined, which

ensure the complete iron reduction from an iron-containing concentrate. The results of experimental studies were obtained by modern research methods using laboratory and analytical equipment, as well as methods of statistical processing. Results of the coals analysis carried out using the Setaram LabSys Evo thermal analyzer showed that the process of thermal decomposition of coals of the studied grades proceeds according to general laws. The process of thermal decomposition of long-flame coal proceeds less intensively than of brown coal. The results of an experimental study of the processes of thermal decomposition of reducing agents have shown that volumes of the gas phases, formed when coals are heated to a temperature of 1173 K in an argon atmosphere, practically coincide with the calculated values. As a result of thermodynamic modeling and experimental study, the optimal consumption of D and 2B grades of coal is determined at a temperature of 1473 K. The best reducing agent with a minimum specific consumption is long-flame coal of D grade. When determining the optimal amount of reducing agent in charge mixtures during the study of metallization processes, it was found that with an excess of reducing agent, it is possible to achieve almost complete extraction (98 – 99 %) of iron from the concentrate.

**Keywords:** thermodynamic modeling, iron-containing concentrate, long-flame coal, brown coal, iron reduction

**Funding:** The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research and the Subject of the Russian Federation (Kemerovo Region – Kuzbass) within the framework of the scientific project No. 20-48-420001/21.

**For citation:** Rybenko I.A., Nokhrina O.I., Rozhikhina I.D., Golodova M.A., Khodosov I.E. Iron reduction from concentrates of hydrometallurgical dressing. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 10, pp. 728–735. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-10-728-735>

## АКТУАЛЬНОСТЬ

В настоящее время современное состояние и развитие металлургии требуют внедрения новых энерго- и ресурсосберегающих технологий, которые позволят частично решить проблему снижения энергетических и сырьевых затрат в металлургической промышленности<sup>1, 2</sup> [1 – 10].

Одним из таких перспективных направлений в металлургии является прямое восстановление металлов из оксидных материалов [11 – 13] как природного, так и техногенного происхождения.

Для железомарганцевых руд Кемеровской области – Кузбасса на основании теоретических и экспериментальных исследований предложена двухстадийная схема обогащения, позволяющая получать высококачественные концентраты марганца (58 – 60 % Mn) и железосодержащие концентраты (48 – 54 % Fe) [14]. Указанные концентраты пригодны к использованию в металлургическом производстве.

Разработка технологий прямого восстановления металлов требует предварительных исследований, направленных на определение оптимальных условий реализации восстановительных процессов, которые сопровождаются комплексом физико-химических превращений, протекающих в условиях твердых, жидких и газообразных сред.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И МАТЕРИАЛЫ

Для определения оптимальных условий реализации процессов восстановления железа из концентрата, полученного при гидрометаллургическом обогащении железомарганцевых руд, были проведены термодинамическое моделирование и лабораторные исследования процессов термического разложения восстановителей и металлизации концентрата.

Определение области допустимых значений термодинамических функций и параметров сложных многокомпонентных металлургических систем, в которых изменения состояния сопровождаются фазовыми, полиморфными и химическими превращениями, является сложной задачей по сравнению с постановками классической термодинамики для элементарных систем или отдельных реакций. Решить такую задачу можно только путем полного термодинамического анализа, позволяющего определять равновесный состав системы по свойствам составляющих ее компонентов при заданных термодинамических параметрах. Для этого предлагается использовать метод термодинамического моделирования, основанного на поиске экстремума термодинамического потенциала, а именно максимума энтропии.

В качестве инструмента при выполнении вычислительных экспериментов с использованием методов термодинамического моделирования выбран программный комплекс «Терра», созданный в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана и предназначенный для расчета термодинамических свойств и состава фаз равновесного состояния произвольных систем с химическими и фазовыми превращениями [15, 16].

Рассматриваемый программный комплекс в настоящее время широко используют при проведении термодинамических исследований в связи с высокой достоверностью получаемых данных [17, 18].

Исследования процесса восстановления железа из концентрата, полученного в результате гидрометаллургического обогащения железомарганцевых руд, проводили с использованием углей двух марок (длиннопламенного (Д) и бурого (2Б)). Химический состав железосодержащего концентрата следующий: 82,3 % Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 4,15 % SiO<sub>2</sub>; 4,9 % CaCl<sub>2</sub>; 2,35 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 2,69 % CaO; 3,6 % Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 0,005 % S; 0,005 % P. Характеристики восстановителей приведены в табл. 1.

Процессы термического разложения углей исследовали с помощью термического анализатора Setaram LabSys Evo. Методы термогравиметрии позволяют

<sup>1</sup> <http://docs.cntd.ru/document/420204426>

<sup>2</sup> <http://ietd.iipnetwork.org/content/slrn-process>

Т а б л и ц а 1

Характеристики восстановителей

Table 1. Characteristics of reducing agents

Показатель	Значение показателя	
	уголь марки Д	уголь марки 2Б
$W^r$	15,4	35,3
$A^d$	5,64	7,83
$V^{daf}$	43,53	46,76
$S^d$	0,26	0,68
Содержание углерода ( $C_{тв}$ ), %	55,6	49,1
Элементный состав на органическую массу, %:		
$C^{daf}$	72,02	70,41
$H^{daf}$	6,12	3,88
$N^{daf}$	1,74	0,98
$O^{daf}$	20,12	22,58
$S^{daf}$	0,34	1,15
Содержание оксидов в золе, %		
$SiO_2$	55,3	11,4
$Al_2O_3$	20,1	5,2
$Fe_2O_3$	8,5	10,3
$CaO$	9,7	42,7
$MgO$	3,7	4,8
$P_2O_5$	1,80	0,02

Пр и м е ч а н и е:  $A^d$  – зольность;  $V^{daf}$  – выход летучих веществ;  $W^r$  – влажность;  $S^d$  – содержание серы.

с высокой точностью определять изменение потери массы при нагреве образца в заданных условиях. Образцы восстановителей нагревали до температуры 1373 К со скоростью 10 К/мин в условиях свободного доступа воздуха.

При экспериментальном изучении процессов термического разложения восстановителей определяли объемы и составы газовых фаз, образующихся при нагреве восстановителей до температуры 1173 К в атмосфере аргона. Исследования проводили с помощью экспериментальной установки, представленной на рис. 1.

Методика эксперимента заключалась в следующем. Образцы для экспериментов готовили путем измельчения восстановителя и отсева фракции от  $-0,125$  до  $+0,050$ . Полученный порошок массой 4 г помещали в керамическую лодочку и слегка уплотняли. Лодочку 3 с навеской помещали в центр кварцевой трубки 2, после чего систему герметизировали. Далее осуществляли продувку системы нейтральным газом при открытом атмосферном клапане 9 в течение 15 мин. Давление в системе поддерживали в диапазоне 5 – 15 мм в.ст. по показаниям U-образного манометра 6. После прекращения подачи нейтрального газа печь включали и нагревали до температуры 1273 К со скоростью 20 К/мин. Образующиеся газы вытесняли солевой раствор воды из газосборника 5. При достижении заданной температуры образец выдерживали в течение 15 мин до полного прекращения поступления воды в колбу 13, после чего перекрывали запорные клапаны 8 и 12. Объем образованного газа соответствовал объему воды в колбе 13.

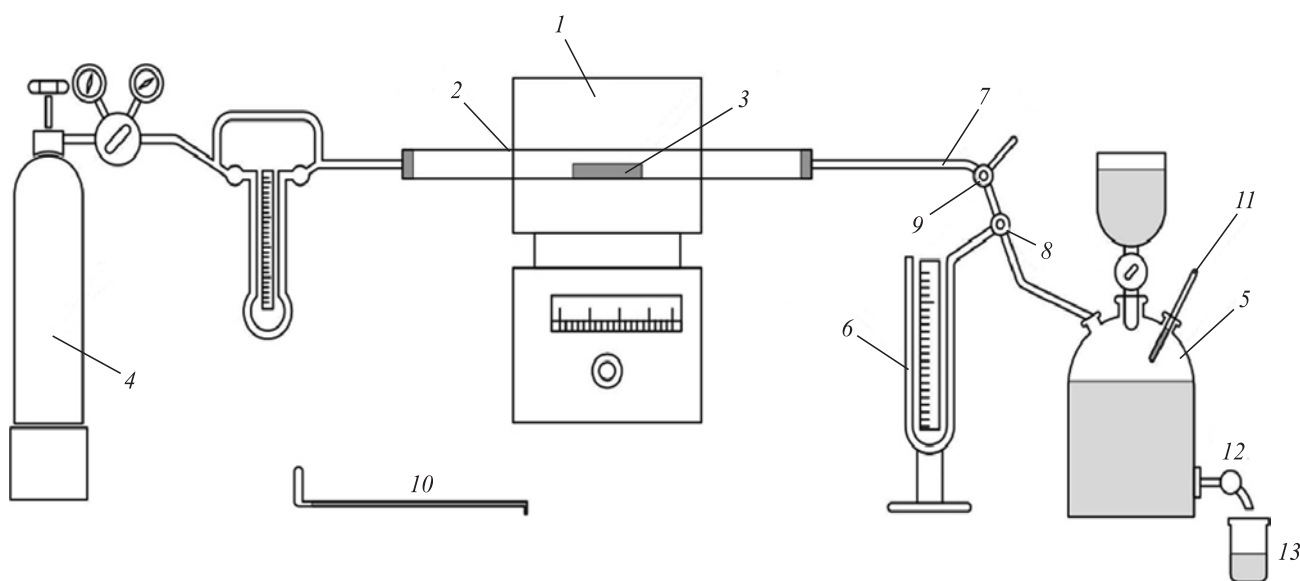


Рис. 1. Схема экспериментальной установки по анализу газовой фазы:

1 – нагревательная печь; 2 – кварцевая трубка; 3 – керамическая лодочка с навеской шихты; 4 – баллон инертного газа (аргон); 5 – газосборник; 6 – U-образный манометр; 7 – стеклянная трубка; 8 – запорный клапан; 9 – атмосферный клапан; 10 – толкатель; 11 – термометр; 12 – кран; 13 – колба для сбора воды

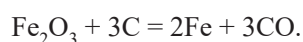
Fig. 1. Scheme of experimental installation for gas phase analysis:

1 – heating furnace; 2 – quartz tube; 3 – ceramic tube with charge attachment; 4 – inert gas cylinder (argon); 5 – gas collector; 6 – U-shaped pressure gauge; 7 – glass tube; 8 – shut-off valve; 9 – atmospheric valve; 10 – pusher; 11 – thermometer; 12 – tap; 13 – flask for water collecting

Для собранного газа фиксировали температуру термометром *11* и проводили вымещение газа через осушитель в рабочую камеру хроматографа. Анализ отобранных газов проводили на хроматографе ЛХМ-8Д.

При изучении процесса металлизации восстановительный обжиг осуществляли в печи Таммана при температурах 1173, 1273, 1373 и 1473 К и времени изотермической выдержки 30 – 80 мин.

Для исследования влияния температуры и длительности восстановительного обжига на процессы металлизации были изготовлены брикеты из железосодержащего концентрата, бурого, длиннопламенного угля и связующего. В качестве связующего использовали жидкое стекло. Содержание углерода в брикете было рассчитано на полное восстановление железа из железосодержащего концентрата:



Состав брикетов приведен в табл. 2.

Полученные брикеты (по одному) помещали в графитовый тигель, после чего тигель с брикетом накрывали графитовой крышечкой. Для выхода избыточного количества газа в крышке предварительно проделывали отверстие.

Тигли с брикетами помещали в предварительно разогретую до температуры эксперимента печь. При достижении необходимого времени выдержки тигли с брикетами извлекали из печи и охлаждали на открытом воздухе. Полученные материалы подвергали химическому анализу.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе с использованием программного комплекса «Терра» было проведено исследование восстановительных свойств углей путем расчетов равновесных составов в диапазоне температур 373 – 1873 К. На рис. 2 приведены зависимости составов и объема газовой фазы, образующейся в результате выделения

Таблица 2

Состав экспериментальных брикетов

Table 2. Composition of experimental briquettes

Брикет	Восстановитель	Содержание, г, в 100 г смеси		Содержание элемента, %				
		концентрат	восстановитель	Fe <sub>общ</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO
Б	Бурый уголь	62,32	34,68	33,40	15,23	3,11	0,92	0,63
Д	Длиннопламенный уголь	67,35	29,65	35,38	15,45	3,05	0,86	0,62

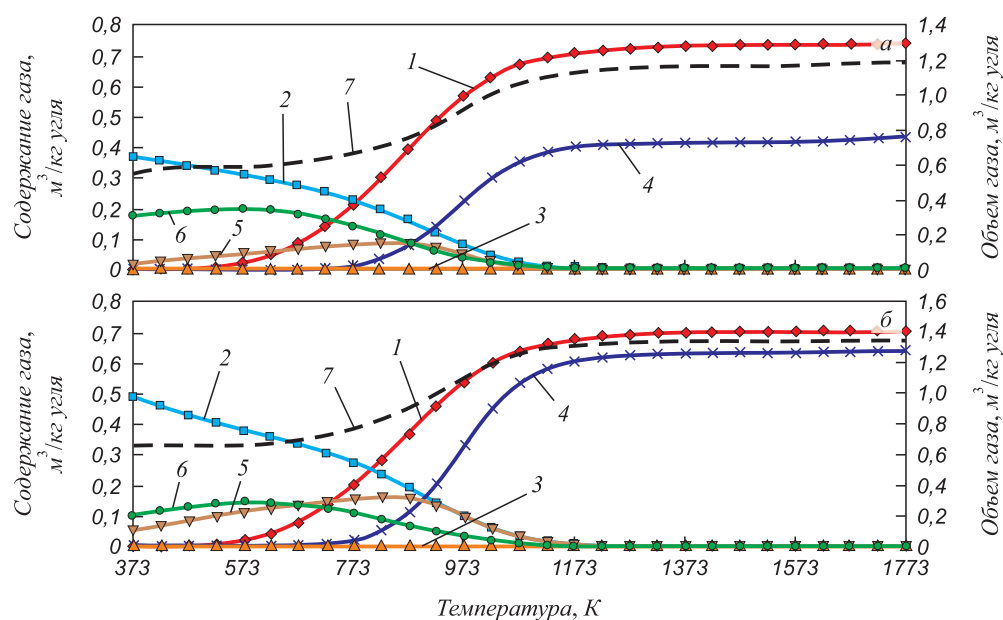


Рис. 2. Зависимости параметров равновесного состава и объема газовой фазы от температуры при нагреве углей марок Д (а) и 2Б (б): 1 – H<sub>2</sub>; 2 – H<sub>2</sub>O; 3 – N<sub>2</sub>; 4 – CO; 5 – CO<sub>2</sub>; 6 – CH<sub>4</sub>; 7 – объем газа, м<sup>3</sup>

Fig. 2. Dependences of parameters of equilibrium composition and volume of the gas phase on temperature when heating coals of grades D (a) and 2B (b):

1 – H<sub>2</sub>; 2 – H<sub>2</sub>O; 3 – N<sub>2</sub>; 4 – CO; 5 – CO<sub>2</sub>; 6 – CH<sub>4</sub>; 7 – volume of the gas, m<sup>3</sup>



летучих компонентов в процессе нагрева, от температур для углей марок Д и 2Б. В температурном диапазоне 373 – 1173 К происходит снижение объемной концентрации водяного пара и метана, а также увеличение концентраций водорода и оксида углерода СО. При этих же температурах в системе в незначительных количествах присутствует оксид углерода  $\text{CO}_2$ , максимальная концентрация которого составляет 0,16 и 0,08 м<sup>3</sup>/кг при температуре 873 К для углей марок Д и 2Б.

При температуре 1173 К соединения  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$  полностью исчезают, состав системы стабилизируется, газовая фаза состоит только из  $\text{H}_2$  и СО. Содержание оксида углерода СО при температурах выше 1173 К составляет 0,42 м<sup>3</sup>/кг для угля марки Д и 0,62 м<sup>3</sup>/кг для угля марки 2Б. Содержание водорода в газовой фазе для рассматриваемых марок угля практически одинаково и составляет примерно 0,7 м<sup>3</sup>/кг. Резкое увеличение объема газа начинается при температуре 673 К. При температуре 1173 К выделение летучих полностью заканчивается, объем газовой фазы с увеличением температуры не меняется и составляет 1,17 и 1,34 м<sup>3</sup>/кг угля марок Д и 2Б.

Далее были проведены исследования процесса твердофазного восстановления железа из концентрата, полученного в результате гидрометаллургического обогащения железомарганцевых руд, углями марок Д и 2Б. Расчеты проводили для 1 кг концентрата, расходы углей варьировали в диапазоне 0,1 – 0,7 кг/кг концентрата. Поскольку полученные ранее результаты термодинамического моделирования восстановительных процессов показали, что восстановление железа из железосодержащих материалов происходит при температурах выше 1073 К [14 – 18], то исследования прово-

дили в диапазоне от 1073 до 1773 К. Результаты расчетов показали, что в заданном интервале температура не влияет на процесс восстановления и количество восстановленного железа зависит только от расхода восстановителя. Зависимости степени восстановления железа от расхода угля различных марок при температуре 1473 К представлены на рис. 3, из которого следует, что необходимое количество угля марок Д и 2Б для полного восстановления железа из 1 кг руды составляет 0,30 и 0,55 кг. При этих расходах восстановителей в системе исчезают оксиды железа, а при увеличении расходов углей выше указанных значений масса восстановленного железа остается постоянной и составляет 0,58 кг/кг концентрата (рис. 3).

Результаты анализа углей, проведенные с помощью термического анализатора Setaram LabSys Evo, показаны на рис. 4, при построении графиков были использованы значения изменения массы ( $TG$ ).

Результаты исследования показали, что процесс термического разложения исследуемых марок углей протекает согласно общим закономерностям и включает в себя две стадии: *I* – удаление гигроскопической и коллоидносвязанной влаги; *II* – резкое изменение массы угля, вызванное выделением летучих и продуктов газификации угля.

Для бурого угля стадия *II* начинается при температуре 716 К, то есть на 60 К ниже, чем термическое разложение длиннопламенного угля. Количество газообразных продуктов, выделяющихся при термическом разложении бурого угля, существенно больше, чем при разложении длиннопламенного. Потеря массы бурого угля составила 90,6 %, длиннопламенного – 84,5 %. Процесс термического разложения длиннопламенного угля протекает менее интенсивно, чем бурого.

Результаты экспериментального изучения процессов термического разложения восстановителей показали, что объемы газовых фаз, образующихся при нагреве 1 г вос-

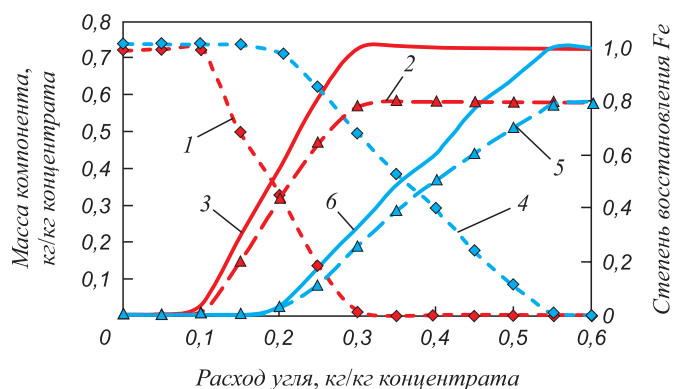


Рис. 3. Зависимости параметров восстановления железа из железосодержащего концентрата от расхода угля разных марок при температуре 1473 К:  
1 – масса FeO (марка Д); 2 – масса Fe (марка Д); 3 – степень восстановления (марка Д); 4 – масса FeO (марка 2Б); 5 – масса Fe (марка 2Б); 6 – степень восстановления (марка 2Б)

Fig. 3. Dependences of parameters of iron reduction from iron-containing concentrate on consumption of coal of different grades at a temperature of 1473 K:  
1 – weight of FeO (grade D); 2 – weight of Fe (grade D); 3 – reduction degree (grade D); 4 – weight of FeO (grade 2B); 5 – weight of Fe (grade 2B); 6 – reduction degree (grade 2B)

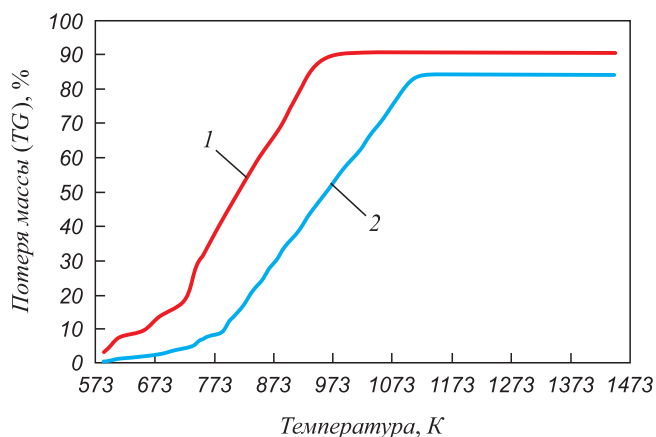


Рис. 4. Результаты термогравиметрического анализа углей:  
1 – уголь марки 2Б; 2 – уголь марки Д

Fig. 4. Results of thermogravimetric analysis of coals:  
1 – coal of grade 2B; 2 – coal of grade D

Т а б л и ц а 3

## Содержание газовой фазы при нагреве восстановителей до температуры 1173 К в атмосфере аргона

Table 3. Content of gas phase when reducing agents are heated to a temperature of 1173 K in an argon atmosphere

Восстановитель	Содержание газа, %					
	CO <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
Уголь марки Д	10,73	16,03	66,01	4,86	2,36	–
Уголь марки 2Б	11,47	6,09	75,59	6,63	0,22	–

становителей до 1173 К в атмосфере аргона, для бурого и длиннопламенного углей составляют 1,20 и 0,85 л, что практически совпадает с расчетными данными (рис. 2). Составы газовых фаз представлены в табл. 3.

Анализ газов показал, что газовая фаза углей преимущественно состоит из водорода. Наибольшее количество водорода содержится в газовой фазе бурого угля, а наибольшее количество оксида углерода СО содержится в газовой фазе коксовой мелочи. Газы, образующиеся при термическом разложении углей, состоят преимущественно из смеси H<sub>2</sub> и СО (более 80 %), газ такого состава обладает высоким восстановительным потенциалом. Газы близкого состава (H<sub>2</sub> + СО = 90 ÷ 92 %) получают при каталитической конверсии природного газа по технологиям Midrex и HyL III, что позволяет предположить, что наряду с твердым углеродом в процессах восстановления железа из оксидов будут участвовать образующиеся газы [19].

Результаты исследований по определению оптимального количества восстановителя в шихтовых смесях при изучении процессов металлизации (табл. 4) показали, что при избытке восстановителя можно достичь практически полного (98 – 99 %) извлечения железа из концентрата.

Оптимальные соотношения компонентов железосодержащий концентрат: уголь: связующее в шихтовой смеси для брикетирования с применением бурого или длиннопламенного углей составляют 68:35:3 и 74:22:3. Такие соотношения соответствуют расходу бурого и длиннопламенного углей 51,4 и 29,7 кг/кг концентрата. Полученные результаты экспериментов по своим значениям близки к данным термодинамического моделирования.

## Выводы

С использованием программного комплекса «Терра» проведено исследование восстановительных свойств углей (длиннопламенного марки Д и бурого марки 2Б) путем расчетов равновесных составов в диапазоне температур 373 – 1873 К, определены зависимости параметров равновесного состава газовой фазы от температуры при нагреве углей марок Д и 2Б. Изучен процесс термического разложения углей при нагреве. Установлено, что процесс термического разложения углей исследуемых марок протекает согласно общим закономерностям, при этом процесс термического разложения длиннопламенного угля протекает менее интенсивно в сравнении с бурым углем. В результате термодинамического моделирования и экспериментального изучения процесса восстановления железа из железного концентрата определены оптимальные расходы углей марок Д и 2Б при температуре 1473 К. Наилучшим восстановителем с минимальным удельным расходом является уголь длиннопламенный марки Д. При определении оптимального количества восстановителя в шихтовых смесях при изучении процессов металлизации установлено, что при избытке восстановителя можно достичь практически полного (98 – 99 %) извлечения железа из концентрата.

Т а б л и ц а 4

## Усредненные результаты экспериментов по определению оптимального количества угля в шихтовой смеси

Table 4. Average results of experiments to determine the optimal amount of coal in charge mixture

Восстановитель	Количество восстановителя (C/C <sub>стех</sub> )	Содержание основных компонентов в продуктах металлизации, %			Степень металлизации, %
		Fe <sub>общ</sub>	Fe <sub>мет</sub>	C	
Бурый уголь	1,1	76,80	76,10	2,7	99,1
	1,0	79,10	77,40	2,5	97,9
	0,9	80,90	78,20	2,1	96,7
	0,8	83,50	79,10	2,1	94,7
Длиннопламенный уголь	1,1	81,10	80,90	2,1	99,8
	1,0	82,51	81,24	2,1	98,6
	0,9	84,81	82,30	1,9	97,0
	0,8	85,10	80,30	1,8	94,4

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Рудыка В.В. Перспективы технологии прямого восстановления железа в металлургическом производстве // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2017. № 10. С. 14–23.
2. Rutherford S.D., Kopfle J.T. Mesabi nugget: World's first commercial ITmk3® plant // AISTech – Iron and Steel Technology Conference Proceedings. 2009. Vol. 1. P. 177–185.
3. Seki K., Tanaka H. Changes in Paradigm – Development of Iron & Steel Industry by Applying Coal Based DR Processes: Fastmelt® & ITmk3®. Kobe Steel Ltd, Tokyo. 2008. 37 p.
4. Nagano K.I. The current status and future of iron ore and coal resources for Japanese steel mills // Tetsu-to-Hagane. 2004. Vol. 90. No. 2. P. 51–60. [https://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.90.2\\_51](https://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.90.2_51)
5. Zhang Y.Y., Qi Y.H., Zou Z.S., Li Y.G. Development prospect of rotary hearth furnace process in China // Advanced Materials Research. 2013. Vol. 746. P. 533–538. <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.746.533>
6. Wiesinger H., Eberle A., Siuka D., Freydorfer H., Böhm C. Status, realized improvements and future potentials of the Corex technology // Stahl und Eisen. 2002. Vol. 122. No. 6. P. 23–28.
7. Nobuhiko T. Development of iron-making technology // Nippon Steel Technical Report. 2012. No. 101. P. 79–88.
8. Kirschen M., Badr K., Pfeifer H. Influence of direct reduced iron on the energy balance of the electric arc furnace in steel industry // Energy. 2011. Vol. 36. No. 10. P. 6146–6155. <http://doi.org/10.1016/j.energy.2011.07.050>
9. Tanaka H., Miyagawa K., Harada T. Fastmet, Fastmelt, and ITmk3: Development of new coal-based ironmaking processes // Direct from Midrex. 2007/2008. P. 8–13.
10. Никитченко Т.В., Тимофеева А.С. Производство железа прямого восстановления // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2014. № 3. С. 46–50.
11. Hryha E., Dudrová E. The sintering behaviour of Fe–Mn–C powder system, correlation between thermodynamics and sintering process, Mn distribution and microstructure // Materials Science Forum. 2007. Vol. 534–536. Part 1. P. 761–764. <https://doi.org/10.4028/0-87849-419-7.761>
12. Sheshukov O., Mikheenkova M., Vedmid L., Nekrasov I., Egiazyryan D. Mechanism of ion-diffusion solid-phase reduction of iron oxides of technogenic origin in the presence of the liquid phase and without it // Metals. 2020. Vol. 10. No. 12. P. 1–12. <https://doi.org/10.3390/met10121564>
13. Нохрина О.И., Рожихина И.Д., Рыбенко И.А., Ходосов И.Е. Разработка основ энергоэффективных процессов металлургической с использованием термодинамического моделирования // Известия вузов. Черная металлургия. 2016. Т. 59. № 4. С. 237–244.
14. Нохрина О.И., Рожихина И.Д., Голодова М.А., Израильский А.О. Изучение возможности обогащения железомарганцевых руд Кузбасса // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2020. Т. 76. № 9. С. 904–909.
15. Ватолин Н.А., Трусов Б.Г., Моисеев Г.К. Термодинамическое моделирование в высокотемпературных неорганических системах. М.: Металлургия, 1994. 352 с.
16. 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.
17. Рыбенко И.А., Нохрина О.И., Рожихина И.Д., Голодова М.А. Моделирование и оптимизация условий и режимов процессов прямого восстановления металлов. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2019. 182 с.
18. Ходосов И.Е., Нохрина О.И., Рожихина И.Д., Рыбенко И.А. Моделирование твердофазного восстановления железа каменными углями. В кн.: Современные проблемы электрометаллургии
1. Rudyka V.V. Prospects of the technology of iron direct reduction in metallurgical production. *Chernaya metallurgiya. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2017, no. 10, pp. 14–23. (In Russ.).
2. Rutherford S.D., Kopfle J.T. Mesabi nugget: World's first commercial ITmk3® plant. *AISTech – Iron and Steel Technology Conference Proceedings*. 2009, vol. 1, pp. 177–185.
3. Seki K., Tanaka H. *Changes in Paradigm – Development of Iron & Steel Industry by Applying Coal Based DR Processes: Fastmelt® & ITmk3®*. Kobe Steel Ltd, Tokyo, 2008, 37 p.
4. Nagano K.I. The current status and future of iron ore and coal resources for Japanese steel mills. *Tetsu-to-Hagane*. 2004, vol. 90, no. 2, pp. 51–60. [https://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.90.2\\_51](https://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.90.2_51)
5. Zhang Y.Y., Qi Y.H., Zou Z.S., Li Y.G. Development prospect of rotary hearth furnace process in China. *Advanced Materials Research*. 2013, vol. 746, pp. 533–538. <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.746.533>
6. Wiesinger H., Eberle A., Siuka D., Freydorfer H., Böhm C. Status, realized improvements and future potentials of the Corex technology. *Stahl und Eisen*. 2002, vol. 122, no. 6, pp. 23–28. (In Germ.).
7. Nobuhiko T. Development of iron-making technology. *Nippon Steel Technical Report*. 2012, no. 101, pp. 79–88.
8. Kirschen M., Badr K., Pfeifer H. Influence of direct reduced iron on the energy balance of the electric arc furnace in steel industry. *Energy*. 2011, vol. 36, no. 10, pp. 6146–6155. <http://doi.org/10.1016/j.energy.2011.07.050>
9. Tanaka H., Miyagawa K., Harada T. Fastmet, Fastmelt, and ITmk3: Development of new coal-based ironmaking processes. *Direct from Midrex*. 2007/2008, pp. 8–13.
10. Nikitchenko T.V., Timofeeva A.S. Production of direct reduction iron. *Chernaya metallurgiya. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2014, no. 3, pp. 46–50. (In Russ.).
11. Hryha E., Dudrová E. The sintering behaviour of Fe–Mn–C powder system, correlation between thermodynamics and sintering process, Mn distribution and microstructure. *Materials Science Forum*. 2007, vol. 534–536, part 1, pp. 761–764. <https://doi.org/10.4028/0-87849-419-7.761>
12. Sheshukov O., Mikheenkova M., Vedmid L., Nekrasov I., Egiazyryan D. Mechanism of ion-diffusion solid-phase reduction of iron oxides of technogenic origin in the presence of the liquid phase and without it. *Metals*. 2020, vol. 10, no. 12, pp. 1–12. <https://doi.org/10.3390/met10121564>
13. Nokhrina O.I., Rozhikhina I.D., Rybenko I.A., Khodosov I.E. Development of the principles of energy efficient processes of metallization using thermodynamic modeling. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016, vol. 59, no. 4, pp. 237–244. (In Russ.).
14. Nokhrina O.I., Rozhikhina I.D., Golodova M.A., Izrail'skii A.O. Possibility of dressing of Kuzbass ferromanganese ores. *Chernaya metallurgiya. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2020, vol. 76, no. 9, pp. 904–909. (In Russ.).
15. Vatin N.A., Trusov B.G., Moiseev G.K. *Thermodynamic Modeling in High-Temperature Inorganic Systems*. Moscow: Metallurgiya, 1994, 352 p. (In Russ.).
16. Trusov B.G. TERRA software system for modeling phase and chemical equilibria at high temperatures. In: *The 3<sup>rd</sup> Int. Symp. "Combustion and Plasmachemistry"*. August 24–26, 2005. Almaty, Kazakhstan. Almaty: Kazak universiteti, 2005, pp. 52–57. (In Russ.).
17. Rybenko I.A., Nokhrina O.I., Rozhikhina I.D., Golodova M.A. *Modeling and Optimization of Conditions and Modes of Direct Metal Reduction*. Novokuznetsk: SibSIU, 2019, 182 p. (In Russ.).
18. Khodosov I.E., Nokhrina O.I., Rozhikhina I.D., Rybenko I.A. Modeling of solid-phase reduction of iron by black coals. In: *Proceedings of the 16<sup>th</sup> Int. Conf. "Modern Problems of Steel Electrometallurgy"*. 2021, pp. 1–10. (In Russ.).

стали. Мат. XVI междунар. конф. в 2-х ч. Магнитогорск: изд. Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), 2015. С. 210–214.

19. Юсфин Ю.С., Пашков Н.Ф. Металлургия железа. М.: Металлургия, 2007. 464 с.

lurgy". Magnitogorsk: izd. South-Ural State Iniversity, 2015, pp. 210–214. (In Russ.).

19. Yusfin Yu.S., Pashkov N.F. *Iron Metallurgy*. Moscow: Metallurgiya, 2007, 464 p. (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

**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

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

**E-mail:** golodova\_ma@mail.ru

**Илья Евгеньевич Ходосов**, к.т.н., инженер, ЗАО «Север Минералс»

**ORCID:** 0000-0003-0935-369X

**E-mail:** Khodosov@mail.ru

**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

**Ol'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

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

**E-mail:** golodova\_ma@mail.ru

**Il'ya E. Khodosov**, Cand. Sci. (Eng.), Engineer, CJSC "Sever Minerals"

**ORCID:** 0000-0003-0935-369X

**E-mail:** Khodosov@mail.ru

Поступила в редакцию 30.03.2021

После доработки 20.04.2021

Принята к публикации 12.05.2021

Received 30.03.2021

Revised 20.04.2021

Accepted 12.05.2021