



Оригинальная статья

УДК 669

DOI 10.17073/0368-0797-2021-11-825-831



## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗА

И. А. Рыбенко, Е. В. Протопопов

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

**Аннотация.** Одним из перспективных направлений в металлургии является использование железосодержащих отходов, таких как шламы конвертерного производства, железосодержащие концентраты, прокатная окалина, отходы обогащения железных руд и другие. Разработка новых ресурсосберегающих технологий с использованием таких отходов требует предварительных исследований и накопления информации в области теории восстановления железа. В работе рассматриваются процессы восстановления железа из оксидов при различных условиях. Используется метод термодинамического моделирования, основанный на поиске максимума энтропии. Инструментом термодинамического моделирования является программный комплекс «Терра», созданный в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана. Комплекс «Терра» предназначен для расчета термодинамических свойств и состава фаз равновесного состояния произвольных систем с химическими и фазовыми превращениями. С использованием этого программного комплекса проведены исследования процессов восстановления железа различными восстановителями (углеродом, марганцем и кремнием) в модельных термодинамических системах, определены оптимальные условия по температуре и расходам восстановителей. В работе представлены результаты исследования процессов в системе металл – шлак, находящейся в равновесии. Проведен анализ равновесного состояния системы металл – шлак в диапазоне температур 1773 – 1973 К при различном количестве шлака. Определены границы областей протекания окислительно-восстановительных процессов и выполнена оценка влияния компонентов металла на условия восстановления оксидов железа из шлака в металл. Получены зависимости равновесного состава системы от температуры при различных соотношениях металла и шлака и определены оптимальные условия восстановления железа.

**Ключевые слова:** термодинамическое моделирование, инструментальная система, восстановление железа, система металл – шлак, термодинамическое равновесие

**Для цитирования:** Рыбенко И.А., Протопопов Е.В. Термодинамическое моделирование процессов восстановления железа // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 11. С. 825–831. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-11-825-831>

Original article

## THERMODYNAMIC MODELING OF IRON RECOVERY PROCESSES

I. A. Rybenko, E. V. Protopopov

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

**Abstract.** One of the promising directions in metallurgy is the use of iron-containing waste, such as converter production sludge, iron-containing concentrates, rolling scale, iron ore processing waste and others. Development of new resource-saving technologies using such waste requires preliminary research and accumulation of information in the field of iron recovery. The paper considers the processes of iron recovery from oxides under various conditions. The authors used the method of thermodynamic modeling based on the search for the entropy maximum. The thermodynamic modeling tool was TERRA software package created at the Bauman Moscow State Technical University. TERRA complex is designed to calculate the thermodynamic properties and composition of the phases of equilibrium state of arbitrary systems with chemical and phase transformations. Using this software package, studies of the processes of iron recovery by various reducing agents (carbon, manganese, and silicon) in model thermodynamic systems were carried out, and optimal conditions for temperature and consumption of reducing agents were determined. The paper presents the results of a study of processes in the metal-slag system in equilibrium. The analysis of the metal-slag system equilibrium state was carried out for the temperature range of 1773 – 1973 K with different amounts of slag. Boundaries of the areas of redox processes were determined and the influence of metal components on conditions for iron oxides recovery from slag to metal was evaluated. The dependences of the system equilibrium composition on temperature at different ratios of metal and slag were obtained, as well as the optimal conditions for iron recovery.

**Keywords:** thermodynamic modeling, instrumental system, iron recovery, metal – slag system, thermodynamic equilibrium

**For citation:** Rybenko I.A., Protopopov E.V. Thermodynamic modeling of iron recovery processes. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 11, pp. 825–831. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-11-825-831>

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из перспективных направлений развития современного металлургического производства является использование железосодержащих отходов [1 – 3]. В качестве таких материалов можно использовать шламы конвертерного производства, железосодержащие концентраты, прокатную окалину, отходы обогащения железных руд и т.д. [4 – 7]. В силу конъюнктурных соображений имеющаяся зарубежная техническая информация [8 – 10] по промышленной эксплуатации новых вариантов восстановительных технологий носит общий и зачастую рекламный характер. Попытки использовать опубликованные в печати рекомендации иностранных фирм не дают стабильных и удовлетворительных результатов и требуют проверки в конкретных условиях. Разработка новых технологий, в которых используются при производстве стали окисные материалы, всегда требует предварительных исследований и накопления информации в области теории восстановления железа из окисных систем различными восстановителями [11 – 14]. Поскольку практические и экспериментальные исследования, как правило, являются достаточно дорогостоящими, а зачастую и неосуществимыми, то большое значение приобретает вычислительный эксперимент, который позволяет анализировать состояние систем, протекающие физико-химические процессы и делать выводы о поведении изучаемых объектов на основании модельных представлений.

В настоящей работе представлены результаты исследования процесса восстановления железа из оксидов при различных условиях. Использован метод термодинамического моделирования, основанный на поиске экстремума термодинамического потенциала, а именно максимума энтропии [15 – 17].

## МЕТОД И ИНСТРУМЕНТ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Метод термодинамического моделирования предоставляет уникальную возможность обобщенного описания любого высокотемпературного состояния с помощью фундаментальных законов термодинамики, независимо от условий и способов достижения равновесия, при минимальной информации о самой системе. Термодинамическая система в данном случае рассматривается как совокупность отдельных подсистем: фаз и индивидуальных конденсированных веществ. В результате для сложной системы (рабочего тела) формулируется задача нахождения равновесного состава компонентов для заданных термодинамических условий, при которых термодинамический критерий, а именно, энтропия системы, представленная функцией параметров состояния, принимает экстремальное значение. Такая формулировка приводит к сложной оптимизационной

задаче, для решения которой используются соответствующие методы и программные средства [15, 16]. Метод максимума энтропии позволяет оценить состав системы в условиях равновесия независимо от способов его достижения и выяснить принципиальную возможность получения тех или иных веществ, выделение которых является основным при решении задачи оценки предельного конечного состояния.

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. Этот программный комплекс предназначен для расчета термодинамических характеристик и состава фаз равновесного состояния произвольных систем с химическими и фазовыми превращениями [17].

С использованием системы «Терра» был проведен ряд исследований по восстановлению металлов в модельных термодинамических системах. Результаты показали хорошую сходимость и согласованность с литературными данными [18 – 20]. В связи с этим использование данной программы является правомерным и допустимым.

В программе осуществляется моделирование предельно равновесных состояний с использованием модели идеального газа. Конденсированные фазы могут быть описаны в приближении несмешивающихся однокомпонентных фаз, идеальных или регулярных растворов. Для задания состава и свойств растворов предусмотрена дополнительная опция. Пока не назначен список веществ ожидаемых конденсированных растворов и не определены парциальные избыточные энтальпии их компонентов, в программной системе все индивидуальные вещества в конденсированном состоянии полагаются однокомпонентными несмешивающимися фазами. Для более сложных моделей конденсированных растворов (строгорегулярные, квазирегулярные, субрегулярные и другие модели) в качестве избыточной энтальпии могут назначаться выражения, зависящие от мольной доли компонента в растворе и температуры [17].

Таким образом, равновесное состояние любой закрытой и изолированной термодинамической системы однозначно определяется значениями двух параметров состояния. В качестве таких характеристик достаточно рассматривать любые две из следующих шести термодинамических параметров: давление, температура, удельный объем, энтропия, полная энтальпия, полная внутренняя энергия.

В программе предусмотрены два варианта моделирования неравновесного состояния:

- непосредственное задание (фиксация) концентраций ряда веществ;
- задание содержания «инертной» (нераагирующей) части веществ в конденсированном состоянии.

В программе существует возможность многовариантных расчетов как в диапазоне концентраций исходных веществ, так и в диапазоне термодинамических параметров, определяющих равновесие, а также возможность записи результатов расчета в файл формата MS Excel с расширением «xls», что облегчает последующую специальную обработку данных и позволяет строить графики. Концентрации компонентов рассчитываются в любой удобной для пользователя размерности.

Элементарная система формируется путем задания числа молей составляющих ее компонентов, при этом в случае необходимости формируются составы конденсированных растворов. В дальнейшем при двух выбранных термодинамических параметрах реализуются многовариантные расчеты равновесных составов в зависимости от этих параметров и расходов исходных материалов. Набор веществ, которые могут образоваться при заданном элементном составе системы, определяли в результате численного моделирования для выбранного диапазона температур и различных термодинамических состояний. Из полного перечня возможных веществ выбирали только те вещества, концентрации которых превышали значение  $10^{-4}$  моль/кг смеси. Проведенные в модельных термодинамических системах исследования по восстановлению металлов показали хорошую сходимость и согласованность с литературными данными [18 – 20].

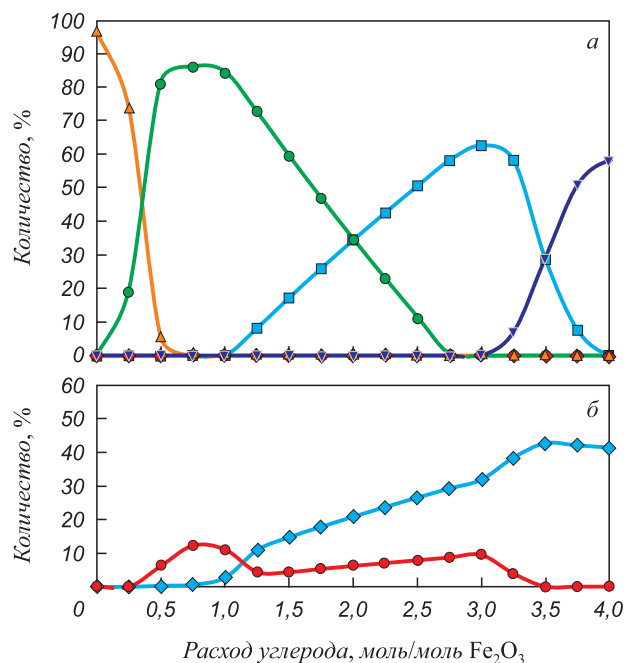


Рис. 1. Зависимости равновесного состава системы  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-C}$  от расхода углерода при температуре 1873 К:

а:  $\blacklozenge$  – C;  $\blacksquare$  – Fe;  $\bullet$  – FeO;  $\blacktriangle$  –  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ;  $\blacktriangledown$  –  $\text{Fe}_3\text{C}$ ;  
 б:  $\blacklozenge$  – CO;  $\bullet$  –  $\text{CO}_2$

Fig. 1. Dependences of equilibrium composition of  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-C}$  system on carbon flow at 1873 K:

а:  $\blacklozenge$  – C;  $\blacksquare$  – Fe;  $\bullet$  – FeO;  $\blacktriangle$  –  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ;  $\blacktriangledown$  –  $\text{Fe}_3\text{C}$ ;  
 б:  $\blacklozenge$  – CO;  $\bullet$  –  $\text{CO}_2$

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗА НА МОДЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Исследование процесса восстановления железа углеродом проводили на модельной системе  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-C}$ . Заданное количество оксида железа составляло 1 моль. Расход углерода варьировали от 0 до 4 молей, от недостатка до избытка количества, необходимого по стехиометрии. Результаты расчетов равновесного состава системы при температуре 1873 К представлены на рис. 1, на котором можно выделить несколько областей. Первая область соответствует изменению расхода углерода от 0 до 0,75 молей: происходит снижение концентрации  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  с одновременным увеличением концентрации FeO в системе; газовая фаза полностью представлена оксидом  $\text{CO}_2$ , максимальная концентрация которого в системе соответствует расходу углерода 0,75 молей и составляет 10 %. Далее при увеличении расхода углерода происходит восстановление FeO и в системе начинает возрастать количество восстановленного железа, максимальная концентрация которого соответствует расходу углерода 3 моля.

При избыточном содержании углерода в смеси количество чистого железа уменьшается и в системе начинает накапливаться карбид  $\text{Fe}_3\text{C}$ . В газовой фазе происходит одновременный рост концентраций CO и  $\text{CO}_2$ . При расходе углерода 3 моля начинает снижаться содержание  $\text{CO}_2$  до его полного исчезновения при расходе углерода 3,5 моля.

Результаты исследования взаимодействия оксида железа с марганцем показали, что марганец полностью восстанавливает железо из оксида во всем диапазоне температур, при которых протекают металлургические процессы.

На рис. 2 представлены результаты расчета равновесных составов в системе  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-Mn}$  в диапазоне

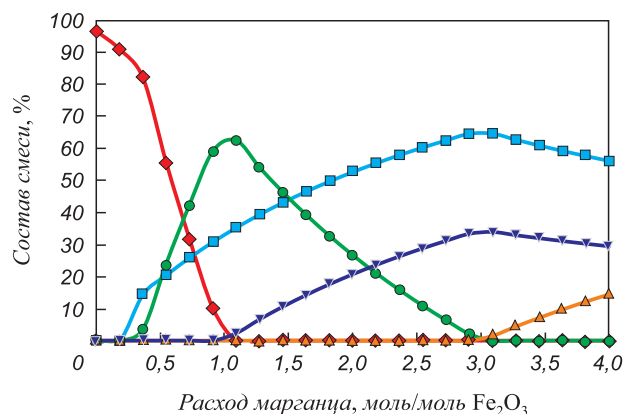


Рис. 2. Зависимости равновесного состава системы  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-Mn}$  от расхода марганца при температуре 1873 К:

$\blacklozenge$  –  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ;  $\blacksquare$  – MnO;  $\bullet$  – FeO;  $\blacktriangle$  – Mn;  $\blacktriangledown$  – Fe

Fig. 2. Dependences of equilibrium composition of  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-Mn}$  system on manganese consumption at 1873 K:

$\blacklozenge$  –  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ;  $\blacksquare$  – MnO;  $\bullet$  – FeO;  $\blacktriangle$  – Mn;  $\blacktriangledown$  – Fe

расхода марганца от 0 до 4 молей при температуре 1873 К.

Количество марганца 1 моль соответствует максимальной концентрации FeO в системе, которая начинает снижаться при увеличении расхода марганца. При количестве 3 моля марганца оксид FeO полностью исчезает. Такой расход соответствует максимальному содержанию железа в системе 65 % и оксида марганца 35 %. Дальнейшее увеличение количества марганца приводит к его накоплению в смеси и разбавлению остальных компонентов.

Результаты исследования взаимодействия оксида железа с кремнием показали, что железо полностью восстанавливается при расходе кремния 1,5 моля во всем диапазоне температур (рис. 3).

**ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ОКИСЛИТЕЛЬНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ  
В СИСТЕМЕ МЕТАЛЛ – ШЛАК**

В работе проведены исследования окислительно-восстановительных процессов, протекающих в системе металл–шлак, которые находятся в равновесии. Металл содержит 4,0 % С; 0,7 % Mn; 0,7 % Si; 0,3 % Р. Химический состав шлака: 10,0 % MnO; 0,3 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; 20,0 % SiO<sub>2</sub>; 50,0 % CaO; 17,0 % FeO.

Были проведены расчеты для 100 кг металла в диапазоне температур 1773 – 1973 К при расходах шлака 8, 10, 12, 14 и 16 кг. На рис. 4, 5 приведены зависимости равновесных содержаний составляющих в металле от температуры при различных расходах шлака. С увеличением температуры происходит снижение концентрации углерода в металле (рис. 4, а), причем при более высоких расходах шлака снижение концентрации углерода начинается при более низких температурах. Так,

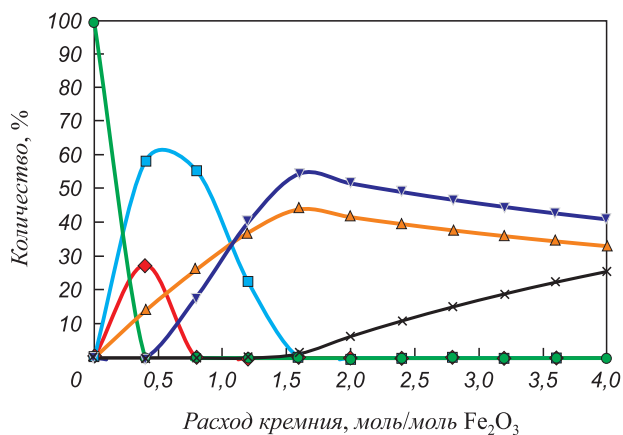


Рис. 3. Зависимости равновесного состава системы Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–Si от расхода кремния при температуре 1873 К:  
◆ – Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>; ■ – FeO; ● – Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; ▲ – SiO<sub>2</sub>; ▼ – Fe; × – Si

Fig. 3. Dependences of equilibrium composition of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–Si system on silicon consumption at 1873 K:  
◆ – Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>; ■ – FeO; ● – Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; ▲ – SiO<sub>2</sub>; ▼ – Fe; × – Si

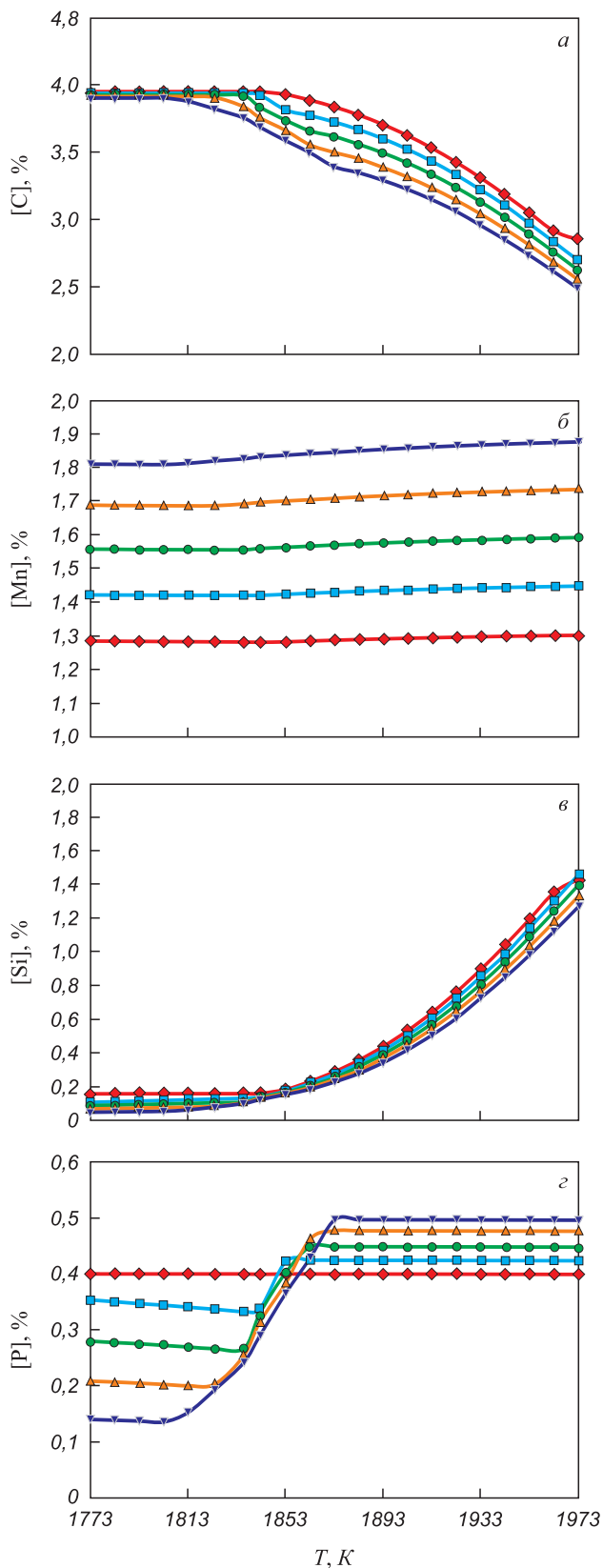


Рис. 4. Зависимости равновесного содержания С (а), Mn (б), Si (в) и Р (г) в металле от температуры при различном количестве подаваемого в систему шлака:  
◆ – 8 %; ■ – 10 %; ● – 12 %; ▲ – 14 %; ▼ – 16 %

Fig. 4. Dependences of equilibrium content of C (а), Mn (б), Si (в) and P (г) in the metal on temperature at different quantity of supplied slag:  
◆ – 8 %; ■ – 10 %; ● – 12 %; ▲ – 14 %; ▼ – 16 %

снижение содержания углерода при расходах шлака 8, 10, 12, 14 и 16 кг на 100 кг металла начинается при температурах 1853, 1842, 1836, 1824 и 1803 К соответственно. Для одинаковой температуры при более высоких расходах шлака в целом концентрация углерода меньше. Например, при температуре 1873 К концентрации углерода 3,84, 3,73, 3,62, 3,50 и 3,39 % соответствуют расходам шлака 8, 10, 12, 14 и 16 кг/100 кг металла. Концентрация марганца в металле с изменением температуры меняется незначительно, но существенно зависит от количества подаваемого в систему шлака (рис. 4, б). Максимальное (1,82 – 1,86 %) содержание марганца соответствует расходу шлака 16 кг/100 кг металла, минимальное (1,28 – 1,30 %) – расходу 8 кг/100 кг металла.

Концентрация кремния в металле, наоборот, существенно зависит от температуры и незначительно от количества шлака (рис. 4, в). При температурах ниже 1853 К содержание кремния в металле не меняется и составляет 0,05 – 0,11 %. При увеличении температуры начинается резкий рост концентрации кремния, которая достигает значений 1,30 – 1,45 % при 1973 К в зависимости от расхода шлака. Минимальные концентрации кремния соответствуют максимальным расходам шлака.

На рис. 4, г приведены зависимости содержания фосфора в металле от температуры при различном количестве шлака в системе. При низких температурах концентрация фосфора постоянна и зависит только от расхода шлака. Максимальная концентрация фосфора 0,4 % соответствует количеству шлака в системе 8 кг, минимальная 0,14 % – 16 кг. При увеличении температуры начинается резкий рост содержания фосфора, причем диапазон температур изменения концентраций фосфора существенно зависит от расхода шлака: 1803 – 1873, 1823 – 1868, 1835 – 1863, 1843 – 1853 К и 0 при расходе шлака 16, 14, 12, 10 и 8 кг шлака на 100 кг металла. После переходного периода содержание фосфора стабилизируется и прямо пропорционально зависит от количества шлака в системе: концентрации фосфора 0,40, 0,42, 0,45, 0,48 и 0,50 % соответствуют расходам шлака 8, 10, 12, 14 и 16 кг/100 кг металла.

На рис. 5, а приведены зависимости равновесного содержания MnO в шлаке от температуры при различных расходах шлака. При низких температурах концентрация MnO постоянна и зависит только от расхода шлака. При повышении температуры содержание оксида марганца начинает снижаться, причем температура начала изменения концентрации оксида марганца тем ниже, чем выше расход исходного количества шлака: для расхода шлака 16 кг/100 кг металла температура начала снижения концентрации оксида марганца составляет 1793 К, а для 8 кг/100 кг металла – 1853 К. Низкие значения концентраций оксида марганца соответствуют минимальным расходам шлака в исходной системе. Аналогичные зависимос-

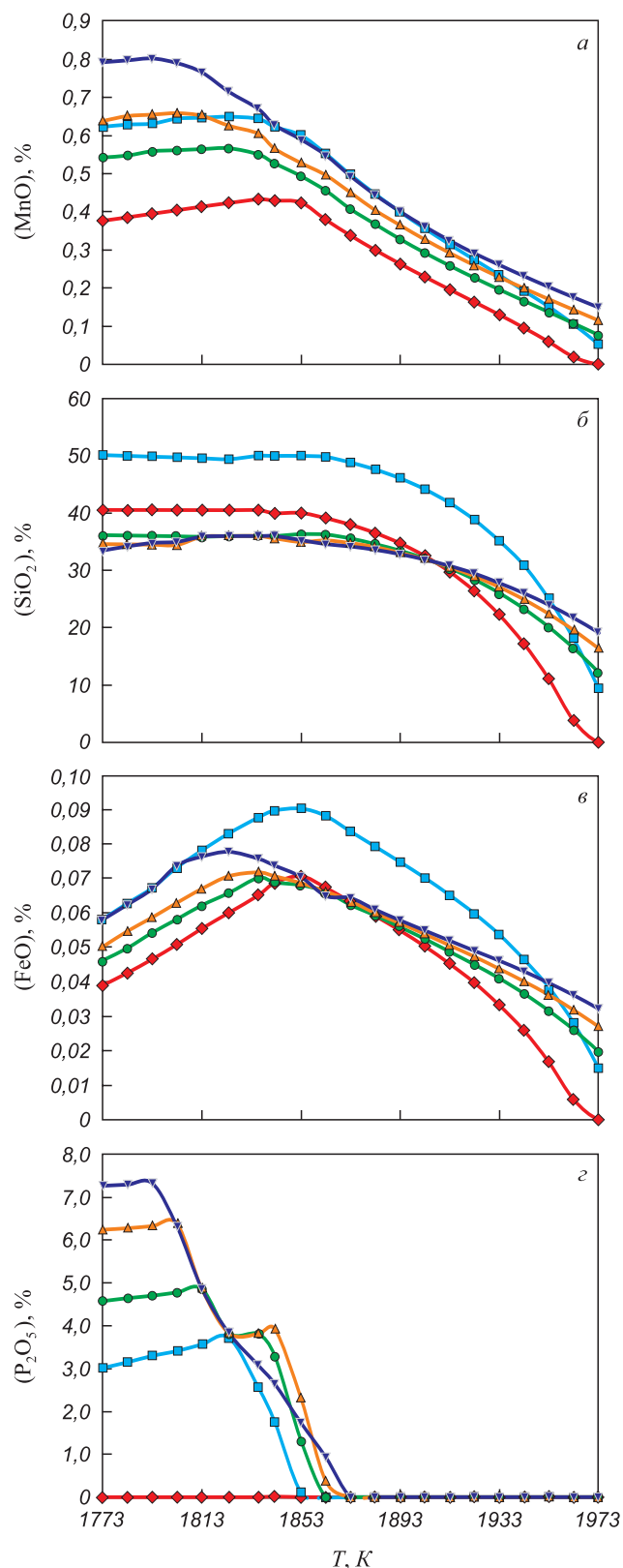


Рис. 5. Зависимости равновесного содержания MnO (а), SiO<sub>2</sub> (б), FeO (в) и P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (г) в шлаке от температуры при различном количестве подаваемого в систему шлака:

◆ – 8 %; ■ – 10 %; ● – 12 %; ▲ – 14 %; ▼ – 16 %

Fig. 5. Dependences of equilibrium content of MnO (a), SiO<sub>2</sub> (б), FeO (в) and P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (г) in the slag on temperature at different quantity of supplied slag:

◆ – 8 %; ■ – 10 %; ● – 12 %; ▲ – 14 %; ▼ – 16 %

ти получены для содержания оксида кремния в шлаке (рис. 5, б), только температуры начала снижения концентраций  $\text{SiO}_2$  сдвинуты вправо и соответствуют примерно 1853 К.

Зависимость равновесного содержания оксида железа от температуры (рис. 5, в) имеет экстремумы. Так, максимальная концентрация  $\text{FeO}$  0,09 % соответствует температуре 1853 К и расходу шлака 10 кг/100 кг металла. Концентрация  $\text{FeO}$  0,078 % соответствует температуре 1873 К и расходу шлака 16 кг/100 кг металла, 0,072 % – 1835 К и 14 кг/100 кг металла, 0,070 % – 1835 К и 12 кг/100 кг металла, 0,071 % – 1853 К и 8 кг/100 кг металла. В целом же концентрации оксида железа в шлаке низкие, железо практически полностью восстанавливается растворенными в металле углеродом, марганцем и кремнием. Фосфор также восстанавливается в металл с повышением температуры (рис. 5, г). Анализ равновесного состава газовой фазы в зависимости от температуры и расхода шлака показал, что при низких температурах в системе присутствуют 40 %  $\text{CO}$  и 60 %  $\text{CO}_2$ , а при высоких температурах газовая фаза состоит из 100 %  $\text{CO}$ .

## Выводы

Проведены исследования процессов восстановления железа различными восстановителями в модельных термодинамических системах, определены оптимальные условия по температуре и расходам восстановителей. Максимальному содержанию железа 65 % в системе  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{–Mn}$  соответствует расход марганца 3 моля, в системе  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{–Si}$  железо полностью восстанавливается при расходе кремния 1,5 моля во всем диапазоне температур. Также проведен анализ равновесного состояния системы металл–шлак в диапазоне температур 1773 – 1973 К при различном количестве шлака в системе. Определены границы областей протекания окислительно-восстановительных процессов и проведена оценка влияния компонентов металла на условия восстановления оксидов железа из шлака в металл. Концентрация  $\text{FeO}$  0,09 % соответствует температуре 1853 К и расходу шлака 10 кг/100 кг металла, 0,078 % – 1873 К и 16 кг/100 кг металла, 0,072 % – 1835 К и 14 кг/100 кг металла, 0,070 % – 1835 К и 12 кг/100 кг металла, 0,071 % – 1853 К и 8 кг/100 кг металла.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

## REFERENCES

1. Люнген Х.Б., Кноп К., Стеффен Р. Современное состояние процессов прямого и жидкофазного восстановления железа // Черные металлы. 2007. № 2. С. 13–25.
2. Юсфин Ю.С., Гиммельфарб А.А., Пашков Н.Ф. Новые процессы получения металла. М.: Metallurgy, 1994. 320 с.
3. Цымбал В.П., Мочалов С.П. Создание новых металлургических процессов и принципов управления на основе синергетического подхода // Известия вузов. Черная металлургия. 2012. № 2. С. 64–68.
4. Нохрина О.И., Рожихина И.Д., Дмитриенко В.И., Прошунин И.Е., Голодова М.А. Особенности применения природных и техногенных материалов для легирования и модифицирования стали // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2019. Т. 75. № 8. С. 944–955. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2019-8-944-954>
5. Роменец В.А. Процесс Ромелт. М.: МИСИС, ИД «Руда и Металлы», 2005. 400 с.
6. Кожухов А.А. Энергосберегающие технологии выплавки стали на основе вспенивания сталеплавильных шлаков. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. 357 с.
7. Цымбал В.П., Протопопов Е.В., Рыбенко И.А., Олеников А.А., Кожемяченко В.И., Сеченов П.А. Экологически замкнутая энергометаллургическая технология переработки пылевидных железорудных и угольных отходов обогащения // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2019. Т. 75. № 4. С. 507–513. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2019-4-507-513>
8. Sakthivel R., Vasumathi N., Sahu D., Mishra B.K. Synthesis of magnetite powder from iron ore tailings // Powder Technology. 2010. Vol. 201. No. 2. P. 187–190. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2010.03.005>
9. Jiabin C., Wenlong J., Lianghui Y. Survey and evaluation of the iron tailings resources in China // Mineral Resources Development. 2010. No. 3. P. 60–62.
10. Bates P., Muir A. Hismelt – low cost iron making. In: Int. Conf. «Commercializing New Hot Metal Processes beyond the Blast Furnace», 2000, June 5–7. Atlanta, Georgia, USA. 2000. P. 1–12.
1. Lyungen Kh.B., Knop K., Steffen R. Current state of the processes of direct and liquid-phase iron recovery. *Chernye metalli*. 2007, no. 2, pp. 13–25. (In Russ.).
2. Yusfin Yu.S., Gimmel'farb A.A., Pashkov N.F. *New Processes of Metal Production*. Moscow: Metallurgiya, 1994, 320 p. (In Russ.).
3. Tsybmal V.P., Mochalov S.P. Creating new metallurgical processes and process control on the basis of synergetic approach. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2012, no. 2, pp. 64–68. (In Russ.).
4. Nokhrina O.I., Rozhikhina I.D., Dmitrienko V.I., Proshunin I.E., Golodova M.A. Peculiarities of application of natural and man-caused materials for steel alloying and modifying. *Chernaya metallurgiya. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2019, vol. 75, no. 8, pp. 944–954. (In Russ.). <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2019-8-944-954>
5. Romanets V.A. *The Romelt Process*. Moscow: MISIS, Ruda i Metall, 2005, 400 p. (In Russ.).
6. Kozhukhov A.A. *Energy-Saving Technologies of Steel Smelting based on Steelmaking Slags Foaming*. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011, 357 p. (In Russ.).
7. Tsybmal V.P., Protopyov E.V., Rybenko I.A., Olenikov A.A., Kozhemyachenko V.I., Sechenov P.A. Ecologically closed energy-metallurgical technology of powdered iron ore and coal-cleaning wastes processing. *Chernaya metallurgiya. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2019, vol. 75, no. 4, pp. 507–513. (In Russ.). <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2019-4-507-513>
8. Sakthivel R., Vasumathi N., Sahu D., Mishra B.K. Synthesis of magnetite powder from iron ore tailings. *Powder Technology*. 2010, no. 201, no. 2, pp. 187–190. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2010.03.005>
9. Jiabin C., Wenlong J., Lianghui Y. Survey and evaluation of the iron tailings resources in China. *Mineral Resources Development*. 2010, no. 3, pp. 60–62.
10. Bates P., Muir A. Hismelt – low cost iron making. In: *Int. conf. «Commercializing New Hot Metal Processes beyond the Blast Furnace»*, 2000, June 5–7, Atlanta, Georgia, USA. 2000, pp. 1–12.

11. Nokhrina O.I., Rozhikhina I.D., Khodosov I.E. Manufacturing and application of metalized ore-coal pellets in synthetic pig iron smelting // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 142. Article 12068.  
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/142/1/012068>
12. Inada Y. Improvements in the MIDREX® direct reduction process // R&D Kobe Steel Engineering Reports. 2000. Vol. 50. No. 3. P. 86–89.
13. Mouer A., etc. Direct from MIDREX, 2<sup>nd</sup> Quarter. 2009. P. 3–9.
14. Kempken J., Kleinschmidt G., Schmale K., Thiedemann U., Gaines H.P., Kopfle J.T. Short route – long-term success, integrated mini-mill solutions by Midrex and SMS Demag // Archives of Metallurgy and Materials. 2008. Vol. 53. No. 2. P. 331–336.
15. Ватолин Н.А., Трусов Б.Г., Моисеев Г.К. Термодинамическое моделирование в высокотемпературных неорганических системах. М.: Металлургия, 1994. 352 с.
16. Белов Г.В., Трусов Б.Г. Термодинамическое моделирование химически реагирующих систем. М.: изд. МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2013. 96 с.
17. Трусов Б.Г. Программная система ТЕРРА для моделирования фазовых и химических равновесий при высоких температурах. В кн.: III межд. симпозиум «Горение и плазмохимия». 24-26 августа 2005. Алматы, Казахстан. Алматы: Казак университети, 2005. С. 52–57.
18. Golodova M.A., Rozhikhina I.D., Nakhrina O.I., Rybenko I.A. Thermodynamic modeling of restoring items converter vanadium slag // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 150. Article 012016.  
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/150/1/012016>
19. Рыбенко И.А., Нохрина О.И., Рожихина И.Д., Голодова М.А., Цымбал В.П. Разработка ресурсосберегающих технологий прямого легирования стали на основе методов термодинамического моделирования процессов восстановления металлов в элементарных системах // Известия вузов. Черная металлургия. 2017. Т. 60. № 2. С. 91–98.  
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-2-91-98>
20. Нохрина О.И., Рожихина И.Д., Рыбенко И.А., Ходосов И.Е. Разработка основ энергоэффективных процессов металлизации с использованием термодинамического моделирования // Известия вузов. Черная металлургия. 2016. Т. 59. № 4. С. 237–244. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2016-4-237-244>
11. Nokhrina O.I., Rozhikhina I.D., Khodosov I.E. Manufacturing and application of metalized ore-coal pellets in synthetic pig iron smelting. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016, vol. 142, article 12068.  
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/142/1/012068>
12. Inada Y. Improvements in the MIDREX® direct reduction process. *R&D Kobe Steel Engineering Reports*. 2000, vol. 50, no. 3, pp. 86–89.
13. Mouer A., etc. *Direct from MIDREX*, 2<sup>nd</sup> Quarter. 2009, pp. 3–9.
14. Kempken J., Kleinschmidt G., Schmale K., Thiedemann U., Gaines H.P., Kopfle J.T. Short route – long-term success, integrated mini-mill solutions by Midrex and SMS Demag. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2008, vol. 53, no. 2, pp. 331–336.
15. Vatolin N.A., Trusov B.G., Moiseev G.K. *Thermodynamic Modeling in High-Temperature Inorganic Systems*. Moscow: Metallurgiya, 1994, 352 p. (In Russ.).
16. Belov G.V., Trusov B.G. *Thermodynamic Modeling of Chemically Reacting Systems*. Moscow: N.E. Bauman MSTU, 2013, 96 p. (In Russ.).
17. Trusov B.G. TERRA software system for modeling phase and chemical equilibria at high temperatures. In: *III Int. Symp. "Combustion and Plasma Chemistry"*. August 24–26, 2005, Almaty, Kazakhstan. Almaty: Kazak universiteti, 2005, pp. 52–57. (In Russ.).
18. Golodova M.A., Rozhikhina I.D., Nakhrina O.I., Rybenko I.A. Thermodynamic modeling of restoring items converter vanadium slag. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016, vol. 150, article 012016.  
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/150/1/012016>
19. Rybenko I.A., Nokhrina O.I., Rozhikhina I.D., Golodova M.A., Tsybmal V.P. Development of resource-saving technologies of steel direct alloying on the basis of thermodynamic modeling of metals recovery processes in elementary systems. *Izvestia. Ferrous Metallurgy*. 2017, vol. 60, no. 2, pp. 91–98. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-2-91-98>
20. 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. *Izvestia. Ferrous Metallurgy*. 2016, vol. 59, no. 4, pp. 237–244. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2016-4-237-244>

#### 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

**Евгений Валентинович Протопопов**, д.т.н., профессор кафедры металлургии черных металлов, Сибирский государственный индустриальный университет  
**ORCID:** 0000-0002-7554-2168  
**E-mail:** protopopov@sibsiu.ru

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

**Evgenii V. Protopopov**, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University  
**ORCID:** 0000-0002-7554-2168  
**E-mail:** protopopov@sibsiu.ru

Поступила в редакцию 22.10.2021  
После доработки 29.10.2021  
Принята к публикации 01.11.2021

Received 22.10.2021  
Revised 29.10.2021  
Accepted 01.11.2021