ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

PHYSICO-CHEMICAL BASICS OF METALLURGICAL PROCESSES



удк 669.12.094.1 DOI 10.17073/0368-0797-2025-2-163-170



Оригинальная статья Original article

Термодинамическое моделирование процесса восстановления железорудных материалов водородсодержащими газами

А. Н. Дмитриев¹, Ю. Е. Бурова¹ [□], Г. Ю. Витькина¹, Н. М. Барбин^{1, 2}, Д. И. Терентьев²

¹ Институт металлургии Уральского отделения РАН (Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 101) ² Уральский институт государственной противопожарной службы МЧС России (Россия, 620062, Екатеринбург, ул. Мира, 22)

💌 menestrelfox@gmail.com

Аннотация. В статье представлены результаты исследования процессов восстановления железорудных титаномагнетитовых окатышей синтез-газом с помощью термодинамического моделирования с использованием программного комплекса «Терра». Его применение позволило смоделировать и спрогнозировать химические и фазовые превращения в железорудных титаномагнетитовых окатышах при восстановлении с использованием водородсодержащего синтез-газа, учитывая влияние температуры, концентрации водорода и других параметров. Расчеты проводились с различным содержанием газовой смеси для оценки эффективности модели. Содержание газовой смеси СО-N₂-H₂-CH₄ для расчетов изменялось с увеличением СО и H₂, уменьшением N₂ и постоянным CH₄. Термодинамическое моделирование показало, что при достижении баланса основных фаз в высокотемпературных системах при восстановлении различными газовыми смесями концентрация распределения кремния, алюминия, титана, магния и кальция остается постоянной. Значительные изменения наблюдаются в концентрации содержания железа, ванадия и марганца, что связано с особенностями процесса восстановления и составом используемых газов. Получены зависимости равновесного состава системы от температуры при различных содержаниях элементов. Построенная термодинамическая модель описывает процесс восстановления и может быть использована для оптимизации данного процесса в различных условиях производства.

Ключевые слова: термодинамическое моделирование, восстановление, водород, синтез-газ, окатыши, титаномагнетит, железо

Благодарности: Работа выполнена в рамках реализации государственного задания Института металлургии Уральского отделения РАН.

Для цитирования: Дмитриев А.Н., Бурова Ю.Е., Витькина Г.Ю., Барбин Н.М., Терентьев Д.И. Термодинамическое моделирование процесса восстановления железорудных материалов водородсодержащими газами. Известия вузов. Черная металлургия. 2025;68(2):163–170. https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-2-163-170

THERMODYNAMIC MODELLING OF REDUCTION OF IRON ORE MATERIALS BY HYDROGEN-CONTAINING GASES

A. N. Dmitriev¹, Yu. E. Burova¹, G. Yu. Vit'kina¹,

N. M. Barbin^{1, 2}, D. I. Terent'yev²

¹ Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (101 Amundsena Str., Yekaterinburg 620016, Russian Federation)

² Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia (22 Mira Str., Yekaterinburg 620062, Russian Federation)

💌 menestrelfox@gmail.com

Abstract. The article presents the results of studying the processes of reduction of iron ore titanomagnetite pellets with synthesis gas by means of thermodynamic modeling using the Terra software package. Its use made it possible to model and predict chemical and phase transformations in iron ore titanomagnetite pellets during reduction using hydrogen-containing synthesis gas, taking into account the effect of temperature, hydrogen concentration and other parameters on reduction. Calculations were performed with different gas mixture contents to evaluate the model efficiency. Content of the $CO-N_2-H_2-CH_4$ gas mixture for calculations varied with an increase in CO and H_2 , decrease in N_2 and constant CH_4 .

Дмитриев А.Н., Бурова Ю.Е. и др. Термодинамическое моделирование процесса восстановления железорудных материалов ...

Thermodynamic modeling showed that when balance of the main phases in high-temperature systems is achieved during reduction with various gas mixtures, the concentration of distribution of silicon, aluminum, titanium, magnesium, and calcium elements remains constant. Significant changes are observed in the concentration of iron, vanadium, and manganese, which is associated with the features of reduction process and composition of the gases used. Dependences of the system equilibrium composition on temperature at various element contents were obtained. The constructed thermodynamic model describes the reduction process and can be used to optimize it under various production conditions.

Keywords: thermodynamic modeling, reduction, hydrogen, synthesis gas, pellets, titanomagnetite, iron

Acknowledgements: The work was performed within the framework of the State assignment of the Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

For citation: Dmitriev A.N., Burova Yu.E., Vit'kina G.Yu., Barbin N.M., Terent'ev D.I. Thermodynamic modelling of reduction of iron ore materials by hydrogen-containing gases. Izvestiya. Ferrous Metallurgy. 2025;68(2):163–170. https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-2-163-170

Введение

В настоящее время большое внимание уделяется развитию различных способов декарбонизации металлургического производства. Классический процесс получения металла в доменных печах подразумевает выбросы в атмосферу большого объема углекислого газа. Одним из решений является движение в сторону декарбонизации без кардинальных изменений в производственном процессе, используя улавливание выбросов СО₂ и их последующую утилизацию или хранение. Вторым кардинальным решением является замена СО на чистый водород или, что более выполнимо, использование синтез-газа - комбинации водорода и монооксида углерода, которая заменяет в доменном процессе значительную часть твердого углеродного топлива и создает потенциал для движения к декарбонизации, обеспечивая соблюдение высоких экологических стандартов [1 – 3].

Одним из решений задачи снижения выбросов CO_2 при производстве чугуна является вдувание коксового и доменного газов в доменные печи для снижения удельного расхода кокса. Для эффективного вдувания доменного газа необходимо максимально возможное снижение содержания CO_2 и H_2O [4 – 5]. Коксовый газ в этом отношении гораздо более технологичен – содержание CO_2 в нем составляет около 3 об. %. Например, компания ArcelorMittal анонсировала технологию вдувания коксового газа на комбинате в Испании¹. Компании Dillinger и Saarstahl на комбинате Rogesa вложили 14 млн евро в строительство нового завода по конверсии коксового газа для вдувания в доменные печи². По разным оценкам вдувание 100 м³ коксового газа на 1 т чугуна позволит снизить потребление углерода кокса на 30 кг/т чугуна.

По техническим причинам использование одного лишь водорода в доменной печи невозможно, поэтому применение водорода в схеме «доменная печь – конвертер» может расцениваться лишь как переходный шаг на пути к производству по принципу прямого восстановления железа³ [6 – 8].

Многие исследования посвящены получению богатого водородом газа при газификации различных биомасс [9–13]: древесный уголь, смола, углеводороды, древесина, синтетический природный газ, что на малых предприятиях становится одной из мер по снижению выбросов CO₂.

Восстановление железорудных материалов водородсодержащими газами в процессе производства чугуна сопряжено с трудностями [14 – 17]. Благодаря вычислительному эксперименту есть возможность проанализировать состояние системы, физико-химических процессов и на основе модельных представлений сделать выводы о поведении изучаемых веществ.

Исчерпание запасов традиционного передельного железорудного сырья Урала на протяжении более 300 лет ставит перед черной металлургией задачу перехода на новые виды руды. В качестве альтернативы рассматривается титансодержащее сырье, содержащее, помимо железа, ванадий и титан. Его комплексная переработка, включающая получение стали, пентаоксида ванадия, пигментного диоксида титана и титановой губки, представляет собой экономически и технологически сложную задачу, требующую оптимизации процессов извлечения всех ценных компонентов. Для ее решения, как показал опыт Института металлургии УрО РАН, перспективным направлением является применение информационных систем, описывающих физико-химические и теплофизические процессы, протекающие в металлургических агрегатах. Такие системы позволяют оптимизировать технологические параметры и повысить эффективность извлечения целевых компонентов, что имеет решающее значение для рентабельности переработки титансодержащих руд.

Целью работы является исследование термодинамики процесса восстановления железорудных титано-

¹ Газ при производстве металла [Электронный ресурс]. URL: https://stal-kom.ru/gaz-pri-proizvodstve-metalla/. (Дата обращения: 07.03.2025).

² В Германии запустили первое производство стали на водороде [Электронный pecypc]. URL: https://gmk.center/news/v-germaniizapustili-pervoe-proizvodstvo-stali-na-vodorode/. Дата обращения: 07.03.2025.

³ Thyssenkrupp переводит одну из доменных печей на водород [Электронный pecypc]. URL: https://metallurgprom.org/articles/ analytics/877-thyssenkrupp-perevodit-odnu-iz-domennyh-pechej-navodorod.html. Дата обращения: 07.03.2025.

магнетитовых окатышей в атмосфере различных смесей газов (схожими по составу с синтез-газом, доменным, кокосовым и иными технологическими газами, содержащими водород и перспективными в плане рециклинга).

Методы исследования

В данной работе применен метод термодинамического моделирования, который заключается в анализе равновесного состояния систем. Исследования проводили с помощью программного комплекса «Терра», разработанного в МГТУ им. Н.Э. Баумана [18–20]. Достоинствами данного комплекса являются:

– задание условий равновесия термодинамической системы с окружающей средой любой парой термодинамических параметров (P (давление), V (удельный объем), T (температура), S (энтропия), H (энтальпия) и U (внутренняя энергия));

 проведение равновесного расчета термодинамической системы произвольного элементного состава;

 – включение в число ожидаемых компонентов состава любых индивидуальных веществ за счет изменения исходных данных и определение равновесного фазового состава системы без предварительного указания термодинамически допустимых состояний;

 возможность исключения из числа компонентов равновесного состава любых веществ;

 назначение концентрации веществ с расчетом по оставшейся части системы;

 – учет занимаемого конденсированного веществами объема и т.д.

Материалом для исследования послужили титансодержащие железорудные окатыши. Исходный химический состав окатышей представлен в табл. 1. Моделирование восстановления окатышей рассчитывалось для атмосферы смесей газов CO-N₂-H₂-CH₄. Составы восстановительных газов приведены в табл. 2.

Использованная в расчете база данных составлена на основе информации ИВТАНТЕРМО и HSC и содержит наборы термодинамических свойств как исходных компонентов газовой фазы (CO, CH₄, H₂, N₂), так и предполагаемых продуктов их взаимодействий (CO₂, H₂O и множества других), а также конденсированного углерода (графита).

В качестве двух независимых параметров использовались температура (интервал 493 – 1793 К с шагом 100 К) и давление (0,1 МПа).

Результаты исследования и их обсуждение

Исходная система при восстановлении окатышей в атмосфере водородсодержащих газов состоит из газовой и конденсированных фаз. Газовая фаза содержит СО, N_2 , H_2 и CH₄. Конденсированная фаза состоит из металлического раствора *s*1 и оксидного раствора *s*2.

Состав оксидной конденсированной фазы представлен на рис. 1.

Из графических данных видно, что наиболее значимыми компонентами являются Fe(s1), FeO(s2), $Fe_3O_4(s2)$ с концентрацией выше 10^{-1} мол. дол. В интервале температур 1100 - 1793 К (рис. 1, *a*) преобладающим компонентом становится Fe(s1) с концентрацией 0,88 мол. дол. При восстановлении в смеси газов 2 и 3 преобладающим компонентом в интервале температур 1193 - 1793 К становится Fe(s1) (рис. 1, *б*, *в*).

Изменения состава газовой фазы приведены на рис. 2. При температуре выше 900 К основными компонентами газовой фазы являются H_2 , N_2 ($p \sim 0.58$ атм.) и CO.

Фазовое распределение железа, ванадия и марганца в зависимости от температуры представлено на рис. 3. В температурном диапазоне 500 - 893 К преобладающей фазой железа является $Fe_3O_4(s2)$, составляя от 0 до 86 мол. %. В интервале температур 593 - 993 К присутствует FeO(s2) в количестве от 11 до 40 мол. %. При температуре 993 К происходит образование карбида железа $Fe_3C(s2)$ в концентрации 88, 94 и 95 мол. %. Формирование карбида $Fe_3C(s2)$ обусловлено увеличением содержания углерода в газовой фазе, что подтверждается ростом концентрации СО и CO_2 . Повышение температуры до 1000 – 1793 К приводит к появлению металлического железа Fe(s1) с концентрацией от 89 до 98 мол. %.

При температуре 500 К наблюдается преобладание конденсированного силиката марганца $Mn_2SiO_4(s2)$, составляющего приблизительно 85 мол. %. В диапазоне температур 593 – 1093 К происходит снижение содержания $Mn_2SiO_4(s2)$ до 15, 13 и 12 мол. %, сопровождающееся увеличением концентрации конденсированного оксида марганца MnO(s2) с 34 до 86 мол. %. При дальнейшем повышении температуры до 1700 К наблюдается увеличение содержания газообразного гидрида марганца MnH до 9, 34 и 55 мол. %.

В температурном интервале 500 – 793 К преобладающей фазой ванадия является конденсированный V₂O₃(s2), составляющий около 96 мол. %. Повышение

Таблица 2. Составы восстановительных газов

Table 2. Compositions of reducing gases

Содержание, мас. % Номер CO N_2 H, CH. 1 20 65 10 5 2 35 35 25 5 3 50 5 40 5

Габлица	1. Исходныи состав системы
для	восстановления газами

Table 1. Initial composition of the gas reducing system

Содержание, мас. %										
Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	SiO ₂	V ₂ O ₅	TiO ₂	MgO	MnO	Al ₂ O ₃		
82,83	3,00	1,19	4,20	0,54	2,75	2,85	0,24	2,40		



Температура, К

Рис. 1. Состав конденсированной оксидной фазы при восстановлении газом: M_i – концентрация *i*-го компонента в системе мольных долей (1,00 мол. дол. = 100 мол. %): a – смесь газов *l*; δ – смесь газов *2*; s – смесь газов *3*

Fig 1. Composition of the condensed oxide phase during gas reduction:

 M_i – concentration of the *i*-th component in the system of mole fractions (1.00 mol. fr. = 100 mol. %): a – gas mixture 1; δ – gas mixture 2; e – gas mixture 3



Рис. 2. Состав газовой фазы при восстановлении различными смесями газов (*I*, *II*, *III*)

Fig. 2. Gas phase composition during reduction with different mixtures of gases (I, II, III)

температуры до 1700 К приводит к плавному снижению доли $V_2O_3(s2)$ до 26, 22 и 19 мол. %. Одновременно с этим наблюдается рост концентрации конденсированного оксида ванадия VO(s2) при температуре выше 893 К. Также увеличение температуры сопровождается повышением содержания конденсированного $V_3O_5(s2)$ до 29, 16 и 10 мол. % при 1700 К.

В диапазоне температур от 500 до 1493 К основная часть кремния находится в виде конденсированного силиката магния $MgSiO_3(s2)$, концентрация которого составляет от 27 до 43 мол. %. Содержание силиката кальция $CaSiO_3(s2)$ (около 16 мол. %) и силиката магния $Mg_2SiO_4(s2)$ (от 22 до 26 мол. %) остается практически неизменным в температурном интервале 500 – 1700 К. Повышение температуры до 1500 – 1700 К приводит к увеличению содержания конденсированного диоксида кремния $SiO_2(s2)$ до 34 мол. %.

Исследование фазового состава образца при повышении температуры от 500 до 1793 К выявило следующие закономерности. В начальном состоянии (500 К) Al₂O₃(s2) является преобладающей минеральной фазой алюминия, составляя 70 мол. %. При нагреве до 1700 К содержание $Al_2O_2(s2)$ снижается до 58 мол. %, что свидетельствует о протекании фазовых превращений. Одновременно наблюдается увеличение концентрации $MgAl_2O_4(s2)$ от 30 до 42 мол. %, что указывает на образование новой фазы. В температурном интервале 500 – 1700 К основной минеральной фазой титана является TiO₂(s2). В диапазоне 993 – 1700 К содержание TiO₂(s2) уменьшается с 70 до 43 мол. %. Содержание $CaTiO_{2}(s2)$ стабильно сохраняется на уровне 28 мол. % в пределах всего исследуемого температурного диапазона. При температуре выше 1093 К наблюдается увеличение концентрации как MgTi₂O₅(s2) (до 12 мол. %), так и Mg₂TiO₄(s2) (до 6 мол. %), что указывает на образование новых минеральных фаз. Преобладающей фазой магния в интервале 500-1793 К является Mg₂SiO₄(s2), его молярная доля составляет 43-54 мол. %. Нагрев до 1793 К приводит к снижению содержания Mg₂SiO₃(s2) с 43 до 27 мол. %. Также



Рис. 3. Баланс железа (*a*), марганца (*б*), ванадия (*в*) по фазам при восстановлении газом: — - смесь газов 1; --- - смесь газов 2; — - смесь газов 3



наблюдается незначительное повышение концентрации $Mg_2TiO_4(s2)$ до 6 мол. %. При температурах от 500 до 1793 К основная часть кальция находится в виде конденсированного $CaSiO_3(s2)$ (~49 – 55 мол. %), $CaTiO_3(s2)$ (~45 мол. %) остается неизменным во всех трех случаях.

Таким образом, повышение температуры до 1793 К сопровождается существенной перестройкой минерального состава, что обусловлено реакциями между различными фазами. При изменении содержания СО, N₂ и H₂ в смеси газов концентрация распределения элементов кремния, алюминия, титана, магния и кальция остается неизменна. Значительные изменения можно наблюдать у железа, ванадия и марганца.

В интервале температур 500 - 893 К происходит уменьшение количества конденсированной фазы Fe₃O₄(s2), а в смеси газов 3 количество Fe₃O₄(s2) в интервале температур меньше, чем в смеси газов 1. Пик содержания FeO(s2) в системе при температуре 793 К в смеси газов 1 и 2 составляет ~40 мол. %, а при 693 К в смеси 1 – 34 мол. %. Пик содержания карбида Fe₃C(s2) в системе при температуре 1093 К в смеси газов 3 составляет ~96 мол. %, при 993 К в смеси 2 – ~94 мол. % и в смеси 1 – ~88 мол. %. Появление Fe(s1) начинается при температуре 993 К в смеси газов 1 и 2, в смеси 3 – 1193 К. В восстановительном газе смеси 1 образование Fe(s1) больше, чем в 2 и 3.

При увеличении температуры от 1093 К содержание конденсированного $V_2O_3(s2)$ и $V_3O_5(s2)$ меньше, чем при смеси газов *1*. Большее количество VO(*s*2) получается в смеси газов *3*.

Количество MnO(s2) и $Mn_2SiO_4(s2)$ больше при температуре от 1093 К до 1393 К в смеси газов 3, чем 1, но при температуре от 1393 К до 1793 К в смеси 1 их содержание увеличивается. Также при увеличении содержания водорода в газовой фазе возрастает количество MnH.

Выводы

Исследование термодинамических процессов косвенного восстановления титаномагнетитовых железорудных окатышей различными газовыми средами позволило установить закономерности изменения фазового состава системы в зависимости от температуры и состава восстановительной газовой смеси.

Экспериментально подтверждено, что в интервале температур 500 – 1793 К концентрации кремния, алюминия, титана, магния и кальция в равновесной системе остаются практически неизменными при использовании различных газовых смесей, содержащих СО, N₂, H₂ и CH₄ в разных пропорциях.

При этом наблюдается существенное изменение содержания железа, ванадия и марганца в зависимости от состава газовой смеси. Так, в смеси газов l (20 % CO – 65 % N₂ – 10 % H₂ – 5 % CH₄) наблюдается

снижение содержания карбида $Fe_3C(s2)$ и увеличение содержания Fe(s1), $Fe_3O_4(s2)$, $V_2O_3(s2)$, $V_3O_5(s2)$, MnO(s2) и $Mn_2SiO_4(s2)$ в интервале температур 1393 – 1793 К.

В смеси газов 3 (50 % CO – 5 % N_2 – 40 % H_2 – 5 % CH₄) отмечается уменьшение количества Fe₃O₄(s2) и увеличение содержания FeO(s2), Fe₃C(s2), VO(s2), MnO(s2) и Mn₂SiO₄(s2) в диапазоне температур 1093 – 1393 К.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о значительном влиянии состава восстановительной газовой смеси (содержания водорода) на фазовое равновесие в системе косвенного восстановления железорудных окатышей, что имеет важное значение для оптимизации технологических процессов производства железа.

Список литературы / References

- 1. Дигонский С.В., Тен В.В. Неизвестный водород: роль водорода в полиморфизме твердых веществ, процессах твердофазного восстановления оксидов и спекания порошков. Санкт-Петербург: Наука; 2006:292.
- Морозова О.Н., Павленко А.А., Титов С.С. Способы получения водорода. Южно-Сибирский научный вестник. 2019;(4(28)):188–194. https://doi.org/10.25699/SSSB.2019.28.46373

Morozova O.N., Pavlenko A.A., Titov S.S. Methods of hydrogen production. *South Siberian Scientific Bulletin*. 2019;(4(28)):188–194. (In Russ.). *https://doi.org/10.25699/SSSB.2019.28.46373*

3. Солодова Н.Л., Минигулов Р.Р., Емельянычева Е.А. Водород как перспективный энергоноситель. Современные методы получения водорода. Вестник Казанского технологического университета. 2015;18(3):137–140. https://doi.org/10.24412/Fg4yW5JCGyE

Solodova N.L., Minigulov R.R., Emelyanycheva E.A. Hydrogen as a promising energy carrier. Modern methods of hydrogen production. *Bulletin of Kazan Technological University*. 2015;18(3):137–140. (In Russ.). https://doi.org/10.24412/Fg4yW5JCGyE

4. Ершов Ю.Л., Шакуров А.Г., Паршин В.М., Колесников А.Г., Шишов А.Ю. Водородная эра в отечественной металлургии. Сообщение 1. *Сталь*. 2021;(11):50–55.

Ershov Yu.L., Shakurov A.G., Parshin V.M., Kolesnikov A.G., Shishov A.Yu. Hydrogen era in Russian metallurgy. Report 1. *Steel in Translation*. 2021;51(11):839–845. *https://doi.org/10.3103/S0967091221110048*

5. Ершов Ю.Л., Шакуров А.Г., Паршин В.М., Колесников А.Г., Шишов А.Ю. Водородная эра в отечественной металлургии. Сообщение 2. *Сталь.* 2021;(12):48–56.

Ershov Yu.L., Shakurov A.G., Parshin V.M., Kolesnikov A.G., Shishov A.Yu. Hydrogen era in Russian metallurgy. Report 2. *Steel in Translation*. 2021;51(12):930–938. https://doi.org/10.3103/S0967091221120044

 Gao X., Zhang R., You Zh., Yu W., Dang J., Bai Ch. Use of hydrogen-rich gas in blast furnace ironmaking of V-bearing titanomagnetite: Mass and energy balance calculations. *Materials*. 2022;15(17):6078. https://doi.org/10.3390/ma15176078

- Okosun T., Nielson S., Zhou Ch. Blast furnace hydrogen injection: investigating impacts and feasibility with computational fluid dynamics. *JOM*. 2022;74:1521–1532. https://doi.org/10.1007/s11837-022-05177-4
- Yu X., Hu Z., Shen Y. Modeling of hydrogen shaft injection in ironmaking blast furnaces. *Fuel.* 2021;302:121092. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121092
- Suopajärvi H., Pongrácz E., Fabritius T. Bioreducer use in Finnish blast furnace ironmaking – Analysis of CO₂ emission reduction potential and mitigation cost. *Applied Energy*. 2014;124:82–93.

https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.03.008

- Liu Y., Shen Ya. Modelling and optimization of biomass injection in ironmaking blast furnaces. *Progress in Energy* and Combustion Science. 2021;87:100952. https://doi.org/10.1016/j.pecs.2021.100952
- 11. Luo S., Zhou Ya., Yi Ch. Hydrogen-rich gas production from biomass catalytic gasification using hot blast furnace slag as heat carrier and catalyst in moving-bed reactor. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2012;37(20):15081–15085. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.07.105
- Xie H., Li R., Wang Zh., Yao X., Yu Q. Hydrogen production of bio-oil steam reforming combining heat recovery of blast furnace slag: Thermodynamic analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019;44(47):25514–25523. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.08.014
- Feliciano-Bruzual C. Charcoal injection in blast furnaces (Bio-PCI): CO₂ reduction potential and economic prospects. *Journal of Materials Research and Technology*. 2014; 3(3):233–243. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2014.06.001
- 14. Афанасьев В.К., Горлова С.Н., Кузнецова Е.В., Сочнев А.В., Ефанов Г.И., Толстогузов В.Н., Кусков Б.А. О роли водорода в доменном процессе получения чугуна. Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. 2004;(4(25)):15–18.

Afanas'ev V.K., Gorlova S.N., Kuznetsova E.V., Sochnev A.V., Efanov G.I., Tolstoguzov V.N., Kuskov B.A. On the role of hydrogen in blast furnace process of iron production. *Obrabotka metallov: tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty.* 2004;(4(25)):15–18. (In Russ.).

15. Рогожников С.П., Рогожников И.С. Определение степени использования водорода в доменной печи. Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2020;75(10):1129–1134. https://doi.org/10.32339/0135-5910-2019-10-1129-1134

Rogozhnikov S.P., Rogozhnikov I.S. Determination of degree of hydrogen usage in blast furnace. Ferrous Metallurgy. *Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information.* 2020;75(10):1129–1134. (In Russ.). https://doi.org/10.32339/0135-5910-2019-10-1129-1134

- 16. Ялунин М.С., Витькина Г.Ю., Дмитриев А.Н., Золотых М.О., Алекторов Р.В. Оценка влияния газа-восстановителя с повышенной долей водорода на эффективность доменной плавки. В кн.: Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве (ТИМ'2022). Екатеринбург; 2022:185–190.
- 17. Шевелев Л.Н. Оценка экономической, энергетической и экологической эффективности производства чугуна и стали из рудоугольных брикетов в электросталеплавильном агрегате с использованием водородного топлива. Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и

экономической информации. 2021;77(8):918–924. https://doi.org/10.32339/0135-5910-2021-8-918-924

Shevelev L.N. Assessment of economic, energy and ecological efficiency of iron and steel production from ore-coal briquettes in electric-furnace melting facility with application of hydrogen fuel. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information.* 2021;77(8):918–924. (In Russ.). *https://doi.org/10.32339/0135-5910-2021-8-918-924*

- Ватолин Н.А., Моисеев Г.К., Трусов Б.Г. Термодинамическое моделирование в высокотемпературных неорганических системах. Москва: Металлургия; 1994:352.
- 19. Рыбенко И.А., Протопопов Е.В. Термодинамическое моделирование процессов восстановления железа. Известия вузов. Черная металлургия. 2021;64(11):825–831. https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-11-825-831

Rybenko I.A., Protopopov E.V. Thermodynamic modeling of iron recovery processes. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021;64(11):825–831. (In Russ.).

https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-11-825-831

20. Гамов П.А., Мальков Н.В., Рощин В.Е. Термодинамическое моделирование процесса восстановления металлов из титаномагнетитовых концентратов Суроямского месторождения. Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. 2018;18(2):21–28. http://dx.doi.org/10.14529/met180203

Gamov P.A., Mal'kov N.V., Roshchin V.E. Thermodynamic modelling of the metals' reduction process from the Suroyam titanomagnetite concentrate. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Metallurgy.* 2018;18(2):21–28. (In Russ.). *http://dx.doi.org/10.14529/met180203*

Сведения об авторах / Information about the Authors

Андрей Николаевич Дмитриев, д.т.н., главный научный сотрудник лаборатории пирометаллургии восстановительных процессов, Институт металлургии Уральского отделения РАН ORCID: 0000-0001-6446-0215 *E-mail:* andrey.dmitriev@mail.ru

Юлия Евгеньевна Бурова, младший научный сотрудник лаборатории пирометаллургии восстановительных процессов, Институт металлургии Уральского отделения РАН *ORCID:* 0009-0002-4591-700X *E-mail:* menestrelfox@gmail.com

Галина Юрьевна Витькина, к.т.н., ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией пирометаллургии восстановительных процессов, Институт металлургии Уральского отделения РАН ORCID: 0000-0002-1076-2709 *E-mail:* 20procents@mail.ru

Николай Михайлович Барбин, д.т.н., главный научный сотрудник лаборатории пирометаллургии восстановительных процессов, Институт металлургии Уральского отделения РАН; профессор, Уральский институт государственной противопожарной службы МЧС России

ORCID: 0000-0002-6709-4334 **E-mail:** nmbarbin@mail.ru

Дмитрий Иванович Терентьев, к.х.н., ведущий научный сотрудник, Уральский институт государственной противопожарной службы МЧС России *ORCID:* 0000-0002-3991-4366 *E-mail:* sveripeu@mail.ru

Вклад авторов

А. Н. Дмитриев – научное руководство, формирование основной концепции, цели и задачи исследования.

Ю. Е. Бурова – обработка данных, визуализация результатов исследований, написание и редактирование текста статьи.

Г. Ю. Витькина – обзор публикации по теме статьи, редактирование текста статьи.

Н. М. Барбин – программное обеспечение, рецензирование и редактирование текста статьи.

Д. И. Терентьев – расчет, редактирование текста статьи.

Поступила в редакцию 17.09.2024 После доработки 06.11.2024 Принята к публикации 28.02.2025 Andrei N. Dmitriev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Chief Researcher of the Laboratory of Pyrometallurgy of Reduction Processes, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

ORCID: 0000-0001-6446-0215 *E-mail:* and rey. dmitriev@mail.ru

Yuliya E. Burova, Junior Researcher of the Laboratory of Pyrometallurgy of Reduction Processes, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences ORCID: 0009-0002-4591-700X E-mail: menestrelfox@gmail.com

Galina Yu. Vit'kina, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Head of the Laboratory of Pyrometallurgy of Reduction Processes, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences ORCID: 0000-0002-1076-2709 E-mail: 20procents@mail.ru

Nikolai M. Barbin, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher of the Laboratory of Pyrometallurgy of Reduction Processes, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; Prof., Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia ORCID: 0000-0002-6709-4334 E-mail: nmbarbin@mail.ru

Dmitrii I. Terent'yev, Cand. Sci. (Chem.), Leading Researcher, Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia *ORCID:* 0000-0002-3991-4366 *E-mail:* sveripeu@mail.ru

Contribution of the Authors

A. N. Dmitriev – scientific guidance, formation of the basic concept, goals and objectives of the study.

Yu. E. Burova – data processing, visualization of research results, writing and editing the text.

G. Yu. Vit'kina – literary review, editing the text.

N. M. Barbin – software, reviewing and editing the text. *D. I. Terent'yev* – editing the text.

Received 17.09.2024 Revised 06.11.2024 Accepted 28.02.2025