



УДК 669.1(075.8)

DOI 10.17073/0368-0797-2026-4-324-332



Оригинальная статья

Original article

ДЕКАРБОНИЗАЦИЯ, ВОДОРОДНЫЙ ТРЕНД И ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В МЕТАЛЛУРГИИ

С. Г. Мельник¹, П. В. Ковалев¹, В. И. Бондарь², С. В. Рябошук¹✉,
О. В. Козьминская³, А. А. Ананьев¹, Я. О. Михайлова¹,
А. А. Чиянов¹, С. П. Сёмин³

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (Россия, 1955251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29)

² Приазовский государственный технический университет (Россия, 287642, Донецкая народная республика, Мариуполь, ул. Университетская, 7)

³ Петербургский государственный университет путей сообщения императора Александра I (Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9)

✉ ryaboshuk_sv@spbstu.ru

Аннотация. Исследования и разработка технологий, направленных на снижение последствий глобального потепления, являются весьма актуальными. В работе представлены результаты анализа глобального потепления в атмосфере Земли в связи с естественным и усиленным парниковым эффектом и оценка возможного влияния металлургического производства на формирование усиленного парникового эффекта. Известно, что металлургия вносит около 8 % антропогенного CO₂, что значительно меньше, чем вносят энергетика (24 %), землепользование (18 %), транспорт (14 %) или сельское хозяйство (14 %). Около 80 % «металлургического» CO₂ поставляет доменный процесс, поэтому одна из основных задач металлургии по борьбе с глобальным потеплением заключается в замене технологии получения чугуна в доменных печах бездоменной технологией прямого восстановления железа (DRI) типа Midrex. Вместе с тем вывод из эксплуатации доменных печей потребует значительного времени и на этот переходный период предлагается полигибридная технология декарбонизации процессов восстановления оксидов железа в доменной печи. Эта технология заключается в инициировании реакции конверсии водяного газа (WGSR): $\{H_2O\} + \{CO\} \rightleftharpoons \{H_2\} + \{CO_2\} + Q(-\Delta H)$ путем подачи в печь водяного пара $\{H_2O\}$. В результате термодинамического анализа процесса образования водорода $\{H_2\}$ установлена температура (примерно 1093 К (820 °С)), при понижении которой в соответствии с принципом Ле-Шателье происходит увеличение константы равновесия реакции и количества выделившегося водорода. На основании этого по профилю температуры любой доменной печи может быть определен начальный уровень для размещения устройств подачи пара в рабочее пространство печи. Поскольку реакция WGSR является экзотермической, следует ожидать наряду с интенсифицированием процесса восстановления железа и экономии кокса. Предлагаемая технология не вступает в противоречие с другими процессами декарбонизации, дополняя и увеличивая результативность их действия. Рассмотренная схема использования пара для интенсификации процесса восстановления железа учитывает возможность разработки и применения элементов искусственного интеллекта с учетом особенностей автоматизации и управления этим восстановлением. Авторы заявляют о приоритете предлагаемой ими *полигибридной технологии декарбонизации процессов восстановления оксидов железа* с помощью водорода, образующегося в результате гетерогенно-каталитического процесса на основе реакции водяного газа.

Ключевые слова: парниковый эффект, декарбонизация, оксиды железа, водород, пар, восстановление, конверсия, полигибридное восстановление

Для цитирования: Мельник С.Г., Ковалев П.В., Бондарь В.И., Рябошук С.В., Козьминская О.В., Ананьев А.А., Михайлова Я.О., Чиянов А.А., Сёмин С.П. Декарбонизация, водородный тренд и искусственный интеллект в металлургии. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2026;69(4):324–332. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2026-4-324-332>

DECARBONIZATION, HYDROGEN TREND AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN METALLURGY

S. G. Mel'nik¹, P. V. Kovalev¹, V. I. Bondar'², S. V. Ryaboshuk¹✉,

O. V. Koz'minskaya³, A. A. Anan'ev¹, Ya. O. Mikhailova¹,

A. A. Chiyanov¹, S. P. Semin³

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (29 Politekhnikeskaya Str., St. Petersburg 195251, Russian Federation)

² Azov State Technical University (7 Universitetskaya Str., Mariupol, Donetsk People's Republic 287642, Russian Federation)

³ Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (9 Moskovskii Ave., St. Petersburg 190031, Russian Federation)

✉ ryaboshuk_sv@spbstu.ru

Abstract. Research and development of the technologies aimed at reducing the effects of global warming are very relevant. The paper presents the results of an analysis of global warming in the Earth's atmosphere in connection with the natural and enhanced greenhouse effect and provides an assessment of the possible impact of metallurgical production on the formation of an enhanced greenhouse effect. Metallurgy is known to contribute about 8 % of anthropogenic CO₂, which is significantly less than energy (24 %), land use (18 %), transport (14 %) or agriculture (14 %). About 80 % of the "metallurgical" CO₂ is supplied by the blast furnace process, therefore, one of the main tasks of metallurgy in combating global warming is to replace the technology for producing pig iron in blast furnaces with direct iron reduction (DRI) technology of the Midrex type. At the same time, decommissioning of blast furnaces will take a considerable amount of time, and a polyhybrid technology for decarbonization of iron oxide reduction processes in a blast furnace is proposed for this transition period. This technology consists in initiating the water gas shift reaction (WGSR): $\{H_2O\} + \{CO\} \rightleftharpoons \{H_2\} + \{CO_2\} + Q(-\Delta H)$ by supplying water vapor $\{H_2O\}$ to a furnace. As a result of thermodynamic analysis of the hydrogen formation process $\{H_2\}$, the temperature was established (approximately 1093 K (820 °C)), at a decrease of which, in accordance with the Le Chatelier principle, the reaction equilibrium constant and the released hydrogen amount increase. Based on this, the temperature profile of any blast furnace can be used to determine the initial level for placing steam supply devices in the furnace working space. Since the WGSR reaction is exothermic, it should be expected along with the intensification of the iron reduction process and coke saving. The proposed technology does not conflict with other decarbonization processes, complementing and increasing the effectiveness of their action. The considered scheme of using steam to intensify the iron reduction process takes into account the possibility of developing and applying artificial intelligence elements with the specifics of automation and control of this process. The authors declare the priority of their proposed *polyhybrid technology for decarbonization of iron oxide reduction processes* using hydrogen generated as a result of a heterogeneous catalytic process based on the reaction of water gas.

Keywords: greenhouse effect, decarbonization, iron oxides, hydrogen, steam, reduction, conversion, polyhybrid reduction

For citation: Mel'nik S.G., Kovalev P.V., Bondar' V.I., Ryaboshuk S.V., Koz'minskaya O.V., Anan'ev A.A., Mikhailova Ya.O., Chiyanov A.A., Semin S.P. Decarbonization, hydrogen trend and artificial intelligence in metallurgy. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2026;69(4):324–332.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2026-4-324-332>

ВВЕДЕНИЕ

Более полутора веков назад ученые обратили внимание на изменения климата на Земле, которые сопровождаются увеличением температуры земной атмосферы в результате выделения парниковых газов, образующих парниковый эффект [1–4]. Состав этих газов известен: около 76 % оксида углерода CO₂, 16 % метана CH₄, 6,2 % оксидов азота и небольшие примеси других газов. По мнению основоположника учений о биосфере и ноосфере академика В.И. Вернадского [5], нарушение установившегося баланса обмена энергией и веществом Земли с космосом (увеличением количества угольной кислоты – термин В.И. Вернадского) было вызвано активной деятельностью цивилизованного человека, направленной на биогеохимические процессы в биосфере.

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ И МЕТАЛЛУРГИЯ

Известно два вида парникового эффекта: естественный и усиленный. Естественный парниковый эффект

вызван естественными парниковыми газами, а усиленный парниковый эффект имеет антропогенное происхождение.

За 100 лет с 1850 по 1950 гг. содержание CO₂ в атмосфере Земли возросло примерно на 15 % и продолжает расти и дальше, в том числе в результате разрушительной деятельности человека. По данным Всемирной метеорологической организации (ВМО) содержание CO₂ в атмосфере Земли в течение последних 800 тыс. лет составляло от 200 до 280 ppm, в 2013 г. оно превысило 400 ppm, в 2023 г. – 420 ppm и на 50 % превышает доиндустриальный уровень. Интенсивность возрастания эмиссии CO₂ в атмосфере по данным из шести точек замеров показана на рис. 1, б. Подобная тенденция с 1958 г. подтверждается и графиками Килинга по замерам CO₂ в обсерватории Мануа-Лоа на острове Гавайи. По данным ВМО период 2016–2022 гг. был самым теплым за всю историю наблюдений с 1880 г.

Понятие «углеродной нейтральности» или «нулевого уровня выбросов» не означает полного отсутствия выбросов и свидетельствует лишь о сбалансированном состоянии окружающей среды, когда объемы эмиссии

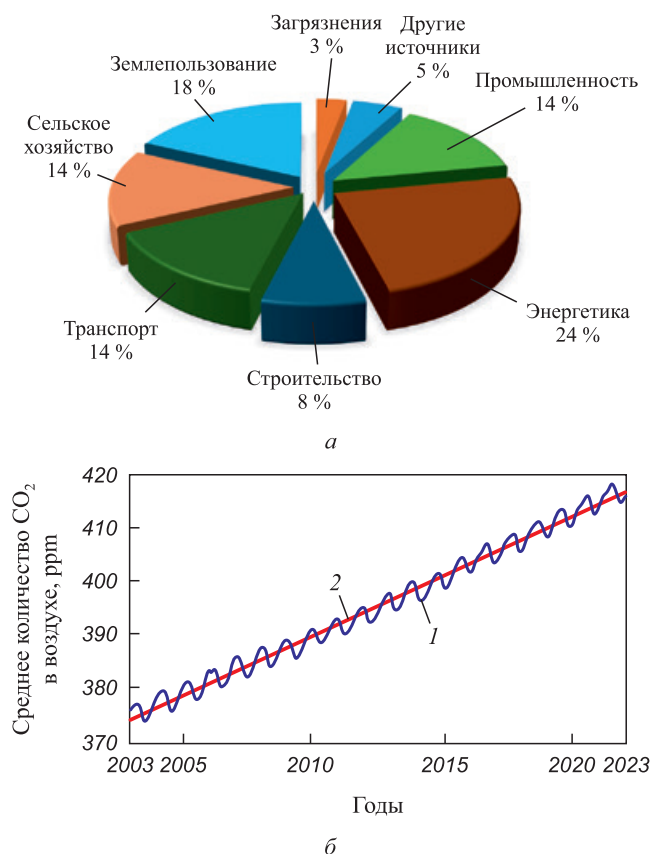


Рис. 1. Эмиссия CO₂ в атмосфере Земли:

а – состав усиленного парникового эффекта;

б – изменение количества CO₂ с 2003 г.;

1 – среднемесячные значения глобальной концентрации CO₂ в атмосфере; 2 – среднегодовые значения глобальной концентрации CO₂ в атмосфере

Fig. 1. CO₂ emissions in the Earth's atmosphere:

а – composition of the enhanced greenhouse effect;

б – change in CO₂ since 2003;

1 – average monthly values of global CO₂ concentration in the atmosphere; 2 – average annual values of global CO₂ concentration in the atmosphere

углекислого газа не превышают его объемов, поглощаемых Землей (ее океанами и лесами) [6; 7].

В промышленности сжигание органических (или ископаемых) веществ, в том числе угля и углеводородного топлива, приводит к увеличению количества CO₂ в атмосфере Земли и формирует порядка 14 % усиленного антропогенного парникового эффекта, включающего вклад металлургии (см. рис. 1). Металлургия вносит около 8 % антропогенного CO₂, что значительно меньше, чем энергетика (24 %), землепользование (18 %), транспорт (14 %) или сельское хозяйство (14 %) [8]. В свою очередь, главным источником CO₂ в металлургии является доменный процесс с выделением до 80 % от всего «металлургического» оксида углерода CO₂. Именно поэтому основное принятое направление борьбы с глобальным потеплением в металлургии заключается в плановом переходе от производства стали в конвертерах, электродуговых печах и других

агрегатах с применением жидкого и твердого переделного чугуна, получаемого в доменных печах, к применению технологии выплавки стали из восстановленного железа, получаемого способами прямого восстановления железа DRI (*Direct Reduced Iron*).

ТЕРМОДИНАМИКА ПРОЦЕССОВ ПОЛУЧЕНИЯ

ВОССТАНОВЛЕННОГО ЖЕЛЕЗА

Применение способов DRI исключает доменные печи из процессов производства железа, то есть эти процессы становятся бездоменными или бескоксовыми [9 – 11]. Технология DRI заключается в производстве металлизированного сырья и последующем переплаве его в электродуговых или других сталеплавильных печах с разливкой полученной стали на МНЛЗ или в изложницы. Наиболее отработана и часто применяется технология получения восстановленного железа DRI типа Midrex, обеспечивающая порядка 60 % металлизированной металлопродукции, получаемой известными способами DRI [12 – 16].

Вместе с тем, до полной замены технологии получения чугуна в доменных печах бескоксовыми процессами DRI еще достаточно далеко и человечество вступает в промежуточный период, который сегодня характеризуется интенсивной эксплуатацией доменных печей и относительно небольшим объемом производства восстановленного железа DRI. Так, по данным Всемирной ассоциации стали WSA, получение восстановленного железа в мире составило в 2024 г. 144,1 млн т (рис. 2), что значительно меньше выплавленной за этот период стали – 1885 млн т. К восстановленному железу относятся металлизированные окатыши, горячебрикетированное железо НБИ, горячекомпактированное железо ГКЖ и губчатое (или бездоменное) железо [17 – 21].

В металлургических процессах, протекающих при выплавке чугуна в восстановительной атмосфере доменной печи, участвуют многочисленные твердые и газообразные компоненты: кокс, мазут, пылеугольное

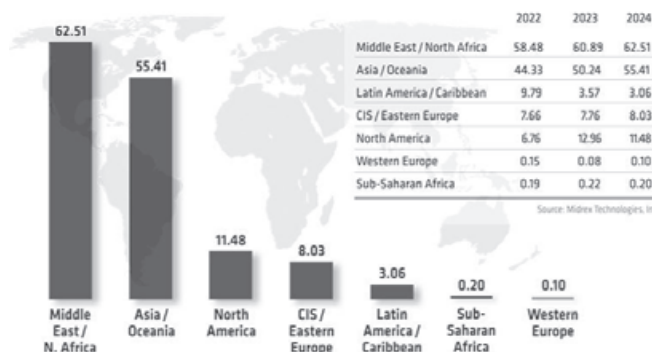
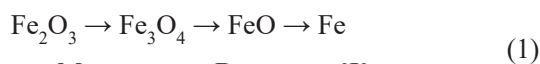


Рис. 2. Мировое производство железа прямого восстановления DRI в 2024 г. по регионам (млн т)

Fig. 2. Global direct reduced iron (DRI) production in 2024 by region (million tons)

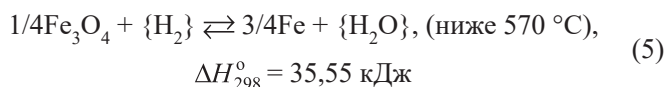
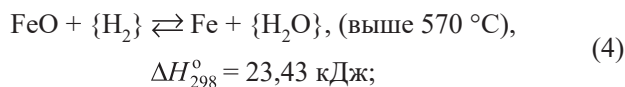
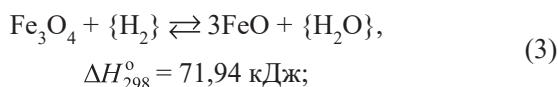
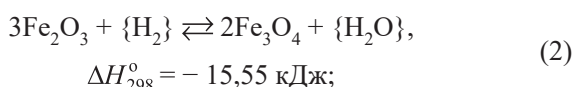
топливо, горючие газы, водород, кислород, углекислый газ и прочие. Химические реакции в металлургических процессах на основе этих компонентов являются гетерогенными (газ + твердая фаза) и гомогенными (газовая фаза) [22; 23]. Восстановителями железа в доменной печи являются оксид углерода CO (угарный газ), водород H₂ и углерод C. Восстановление оксидов железа до железа происходит по известной схеме принципа последовательности превращений академика А.А. Байкова:



Гематит → Магнетит → Вюстит → Железо.

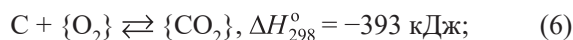
По классификации А.А. Байкова гематит Fe₂O₃ относится к легковосстановимым оксидам, магнетит Fe₃O₄ и вюстит FeO – к равнопрочным и трудновосстановимым оксидам соответственно.

Восстановление оксидов железа водородом может быть представлено реакциями

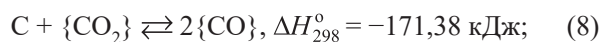


и другими окислительно-восстановительными реакциями. Реакция (2) является экзотермической, реакции (3) – (5) – эндотермические. Реализуемые в доменной печи реакции горения (окисления):

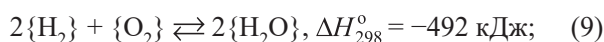
– углерода (углетермические или карботермические реакции)



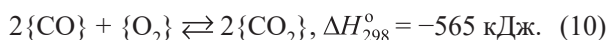
– углерода (реакция Будуара)



– водорода



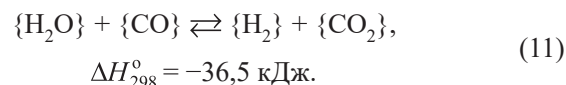
– оксида углерода (угарного газа)



ОСОБЕННОСТИ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

ВЫПЛАВКИ ЧУГУНА С УЧЕТОМ РЕАКЦИИ КОНВЕРСИИ ВОДЯНОГО ГАЗА

В процессе получения чугуна из оксидов железа в восстановительной атмосфере доменной печи участвует еще одна окислительно-восстановительная реакция (11) – реакция водяного газа [22 – 24]:



Иногда в литературе эту реакцию называют реакцией конверсии водяного газа или реакцией конверсии CO водяным паром [25]. Реакция конверсии водяного газа WGSR (*Water – gas shift reaction*) была открыта итальянским физиком Феличе Фонтана в 1780 г. Позднее, в 1830 г., Штрмейер (Германия) предложил добавлять пар к дутью [26]. Исходя из принципа Ле–Шателье, при этом следует ожидать дополнительного выделения водорода. Реакция (11) экзотермическая и привносит тепло в общий тепловой баланс процесса производства чугуна в доменной печи (сопровождается выделением тепла и уменьшением энтальпии). Для стандартных условий рассматриваемой реакции величина изменения энтальпии ΔH_{298}° известна и составляет –36 500 Дж (–8732 кал). Константа равновесия K_p реакции (11) может быть представлена следующим уравнением с учетом парциальных давлений водорода $P_{\{\text{H}_2\}}$, диоксида углерода $P_{\{\text{CO}_2\}}$, монооксида углерода $P_{\{\text{CO}\}}$ и паров воды $P_{\{\text{H}_2\text{O}\}}$:

$$K_p = \frac{P_{\{\text{H}_2\}}}{P_{\{\text{H}_2\text{O}\}}} \frac{P_{\{\text{CO}_2\}}}{P_{\{\text{CO}\}}}. \quad (12)$$

Физико-химический анализ влияния состава на свойства системы с учетом принципа систематизации равновесий для выделенной реакции конверсии водяного газа позволяет применить правило фаз Гиббса и определить число степеней свободы C , то есть число параметров, определяющих состояние системы при равновесии:

$$C = K + 2 - \Phi = 3 + 2 - 1 = 4. \quad (13)$$

Для однофазной ($\Phi = 1$) и трехкомпонентной ($K = 3$) системы число степеней свободы $C = 4$ и тогда

$$P_{\{\text{H}_2\}} = f(T, P_{\{\text{H}_2\text{O}\}}, P_{\{\text{CO}\}}, P_{\{\text{CO}_2\}}). \quad (14)$$

Особенность рассматриваемой системы заключается в постоянстве количества участвующих в химической реакции (11) молекул, что является признаком независимости равновесных условий от общего давления P . Из данных на графиках рис. 3 следует, что

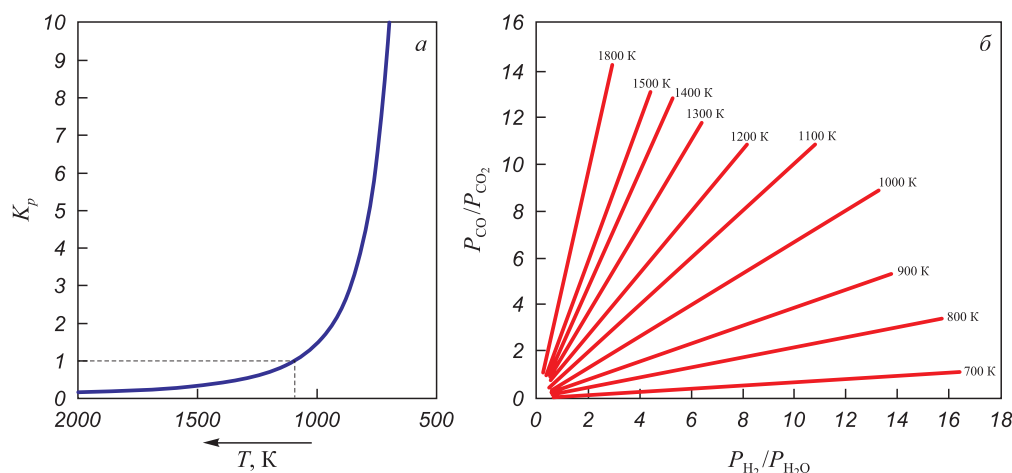


Рис. 3. Результаты термодинамического анализа реакции (11) конверсии водяного газа (WGSR):

a – зависимость константы равновесия реакции K_p от температуры T ;

b – равновесное соотношение P_{H_2}/P_{H_2O} и P_{CO}/P_{CO_2} при различных температурах в газовой фазе из CO, CO₂, H₂O и H₂ [22]

Fig. 3. Results of thermodynamic analysis of reaction (11) of water-gas shift (WGSR):

a – dependence of equilibrium constant K_p of WGSR reaction on temperature T ;

b – equilibrium ratio P_{H_2}/P_{H_2O} and P_{CO}/P_{CO_2} at different temperatures in gas phase of CO, CO₂, H₂O and H₂ [22]

- 1) при $K_p = 1$, $T = 1093$ K (820 °C) и $\frac{P_{H_2}}{P_{H_2O}} = \frac{P_{CO_2}}{P_{CO}}$;
- 2) при $K_p < 1$, $T > 1093$ K и $\frac{P_{H_2}}{P_{H_2O}} < \frac{P_{CO_2}}{P_{CO}}$;
- 3) при $K_p > 1$, $T < 1093$ K и $\frac{P_{H_2}}{P_{H_2O}} > \frac{P_{CO_2}}{P_{CO}}$.

Из результатов анализа следует, что при определенных условиях реакция водяного газа (WGSR) обеспечивает повышение содержания водорода H₂ с понижением температуры и одновременное снижение уровня CO (рис. 3).

Для предлагаемой технологии более эффективного использования пара при восстановлении железорудных материалов этот вывод имеет принципиальное значение, так как обуславливает необходимость изучения кинетических особенностей процесса, в том числе и роли химической реакции водяного газа, к рассмотрению кинетики которой традиционно предполагалось подойти с точки зрения применения закона действующих масс Гульдберга и Вааге. Вместе с тем анализ данных показывает, что при понижении температуры, начиная с $T \approx 1093$ K (или 820 °C), происходит рост значений константы равновесия реакции конверсии водяного газа (11) и, в соответствии с уравнением изобары химической реакции, увеличение количества выделившегося водорода. Это обстоятельство позволяет перейти к анализу кинетики процесса, который косвенно свидетельствует о возможном лимитировании процесса диффузией компонентов [27 – 29]. Вероятнее всего, процесс водяного газа является гетерогенно-каталитическим. Реализация такого процесса предпо-

лагает наличие катализатора, которым в рассматриваемом восстановительном процессе производства чугуна либо металлизированной шихты могут быть железорудное сырье и кокс.

Таким образом, на основании выполненного анализа могут быть определены условия для реализации предлагаемой в этом исследовании полигибридной технологии декарбонизации процессов восстановления оксидов железа, которая интенсифицирует реакцию конверсии водяного газа (WGSR) подачей пара в восстановительный агрегат, например, в доменную печь. На рис. 4 схематично показано оптимальное место подвода пара, например, в магнитогорскую доменную печь объемом 2014 м³ [30] (стрелкой обозначен оптимальный вариант уровня подачи пара по термодинамической модели развития процесса восстановления рудных материалов с участием реакции конверсии водяного газа (WGSR)).

Этот вариант технологии получения чугуна или металлизированного сырья с подачей пара в доменную печь является промежуточным до полной замены доменного процесса на процесс с использованием меньшего количества ископаемых материалов, так как решает поставленную задачу декарбонизации частично. Исследованиям особенностей технологических процессов в металлургии с применением пара в последнее время уделяется особое внимание [31 – 34], а исследования по вдуванию H₂ в доменную печь выполнялись и выполняются с получением различных результатов на оборудовании известных металлургических компаний Thyssen Krupp, Nippon Steel и Tata Steel [35].

Отличие от предлагаемого в настоящей работе варианта технологии в этих компаниях заключается в способе применения H₂, который получают на спе-

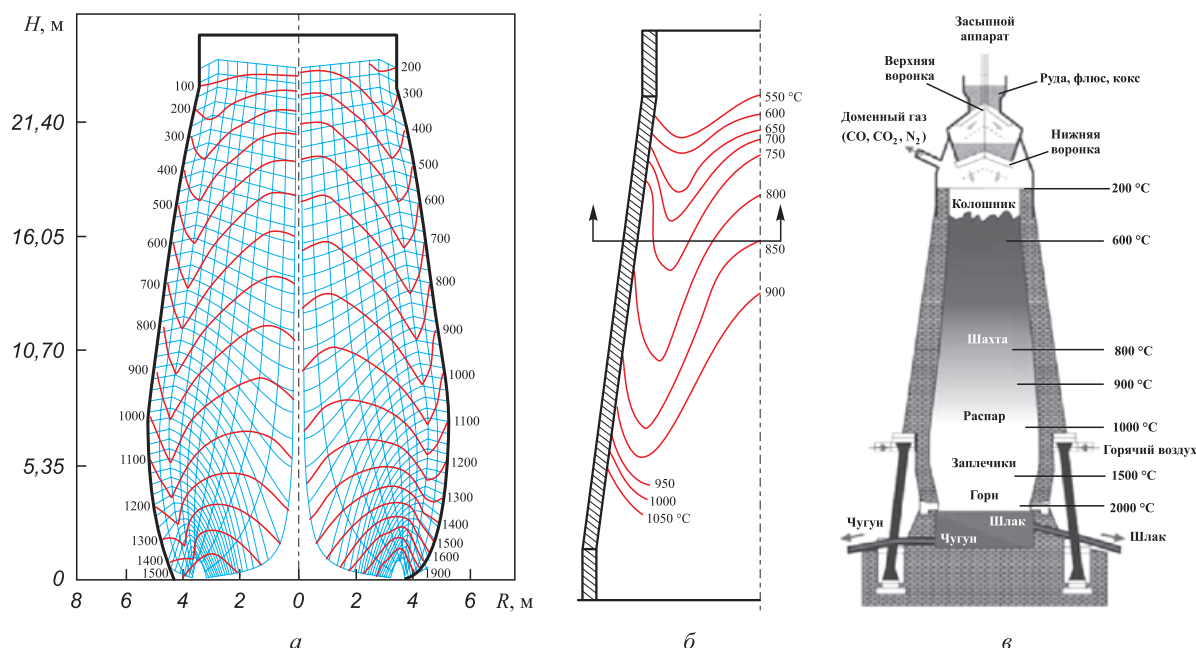


Рис. 4. Температурный профиль доменной печи:

a – результат моделирования [30], в шихте (слева) и в газе (справа);

b – пример магнитогорской доменной печи объемом 2014 м³; c – температурный режим по профилю доменной печи

Fig. 4. Blast furnace temperature profile:

a – simulation result [30], in the charge (left) and in the gas (right);

b – example of the Magnitogorsk blast furnace with a volume of 2014 m³; c – temperature mode along the blast furnace profile

специальных устройствах, что значительно удорожает процесс в целом. В работах [36; 37] также рассматриваются вопросы вдувания H_2 в доменную печь с целью экономии кокса.

Предлагаемая в настоящей работе технологическая схема использования пара для интенсификации процесса восстановления железа из оксидов железа учитывает возможность разработки и применения элементов искусственного интеллекта с учетом особенностей автоматизации и управления процессами восстановления при получении восстановленного железа.

Выводы

Термодинамический анализ доказывает принципиальную возможность применения реакции водяного газа для увеличения восстановительного потенциала газовой фазы при гетерофазном восстановлении оксидов железа в металлургических агрегатах за счет повышения парциального давления водорода P_{H_2} .

Показано влияние температуры газовой фазы T на процесс образования водорода в условиях равновесия реакции водяного газа, подтверждено положительное влияние снижения температуры T в интервале от 727 ± 100 °C и ниже на процесс увеличения содержания водорода в восстановительной газовой фазе.

Предложена полигибридная технология декарбонизации процессов восстановления оксидов железа с помощью водорода, образующегося в результате

гетерогенно-каталитического процесса на основе реакции водяного газа, которая может быть реализована в доменных печах, вагранках, в специальных агрегатах типа Midrex и в других металлургических агрегатах с восстановительной атмосферой.

Для повышения эффективности предлагаемой технологии, имеющей целью совершенствование процессов декарбонизации, необходимо продолжить исследования механизма гетерогенно-каталитического процесса водяного газа с точки зрения макроскопической кинетики, в том числе с изучением возможности применения различных катализаторов для этой цели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Шрайбер В.М. Из истории исследований парникового эффекта земной атмосферы. *Биосфера*. 2013;5(1):37–46. Schraiber V.M. From the history of research on the greenhouse effect of the Earth's atmosphere. *Biosphere*. 2013;5(1):37–46. (In Russ.).
2. Fourier J.B.J. Remarques générales sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires. In: *Annales de Chimie et de Physique, Ser. 2*. Paris: Crochard; 1824;27: 136–67–236–81. (In Fr.).
3. Tyndall J. On the absorption and radiation of heat by gases and on the physical connection of radiation, absorption and conduction. *Philosophical Magazine and Journal of Science*. 1861;(22):169–194 & 273–285. <https://doi.org/10.1098/rstl.1861.0001>

4. Arrhenius S.A. On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. *Philosophical Magazine*. 1896;41:237–276.
5. Вернадский В.И. Биосфера (избранные труды по биогеохимии). Москва: Мысль; 1967;374.
6. Почему все больше стран обещают добиться «углеродной нейтральности»? 3 декабря 2020 г. *Новости ООН*. [Электронный ресурс]. URL: <https://news.un.org/ru/story/2020/12/1391722/> (дата обращения: 26.06.2026).
7. «Момент истины и надежды» – глава ООН призвал человечество добиться углеродной нейтральности к середине века. 12 декабря 2020 г. *Новости ООН*. [Электронный ресурс]. URL: <https://news.un.org/ru/story/2020/12/1392372/> (дата обращения: 26.06.2026).
8. Герашенко И.О., Лapidус А.Л. О влиянии промышленных выбросов углекислого газа на климатические изменения. *Вестник Самарского гос. техн. ун-та. Сер. технические науки*. 2011;(1(29)):201–204.
Gerashchenko I.O., Lapidus A.L. About industrial carbon dioxide emission influence on climate changers. *Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series*. 2011;(1(29)):201–204. (In Russ.).
9. Основы металлургического производства: учебник для вузов / В.А. Бигеев, К.Н. Вдовин, В.М. Колокольцев и др.; под общей редакцией В.М. Колокольцева. Санкт-Петербург: Лань; 2024:616.
10. Производство качественных сталей / В.М. Колокольцев, В.А. Бигеев, С.Ю. Волков, С.Н. Ушаков; под общей редакцией В.М. Колокольцева. Санкт-Петербург: Лань; 2026:416.
11. Основы металлургии: учебник / В.А. Бигеев, В.М. Колокольцев, М.И. Румянцев и др.; под общей редакцией В.М. Колокольцева. Санкт-Петербург: Лань; 2025:616.
12. Рудыка В.И. Перспективы технологии прямого восстановления железа в металлургическом производстве. *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2017;(11(1415)):14–22.
Rudyka V.I. Prospects of direct iron reduction technology in metallurgical production. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2017;(11(1415)):14–22. (In Russ.).
13. Эшонкулов У.Х., Хакимов К.Ж., Каюмов О.А. Изучение технологии прямого восстановления железа. *Central Asian Journal of Theoretical and Applied Sciences*. 2022;3(11):151–156.
Eshonkulov U.Kh., Khakimov K.Zh., Kayumov O.A. The study of direct iron reduction technology. *Central Asian Journal of theoretical and applied sciences*. 2022;3(11): 151–156. (In Russ.).
14. Раковский В.С., Чернова А.А., Дида Н.И., Лопатина А.О. Анализ технологий прямого восстановления железа. *Научно-исследовательские публикации*. 2022;(6):67–74.
Rakovsky V.S., Chernova A.A., Dida N.I., Lopatina A.O. Analysis of technologies for direct iron reduction. *Nauchno-issledovatel'skie publikatsii*. 2022;(6):67–74. (In Russ.).
15. Аксюк А.С., Апойков И.И., Жулин В.В., Петров С.В., Карпешин А.В., Шевченко А.А. Развитие производства железа прямого восстановления – одно из ключевых направлений ОЭМК им. А.А. Угарова. *Черные металлы*. 2022;(11):12–15.
Aksyuk A.S., Apoikov I.I., Zhulin V.V., Petrov S.V., Karpeshin A.V., Shevchenko A.A. Development of direct reduction iron production as one of the key directions of the Ugarov OEMK. *Chernye metallurgy*. 2022;(11):12–15. (In Russ.).
16. Tata Steel выбрала производство DRI с использованием водорода и отменила проект CCS. *Металлургический бюллетень. Информационно-аналитический журнал*. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.metalbulletin.ru/news/black/10160640/> (дата обращения: 26.06.2026).
17. Гладкая Е.А., Елисеев Д.Н., Наринбаев Т.Х.У., Тимофеева А.С. Технология получения горячеприкатированного железа. В кн.: *Сб. трудов LXVII Международной научно-практич. конф. "World science: Problems and innovations"*. Пенза: Наука и Просвещение; 2022:26–29.
18. Патент 2433187 RU. Горячеприкатированное железо (HBI) и способ его получения / Танака Х. (JP), Сугияма Т. (JP); заявл. 07.11.2007; опубликовано 27.12.2010. Бюл. № 36.
19. Тимофеев Е.С., Кочетов А.И., Тимофеева А.С. Зависимость длительности расплавления шихты от ГБЖ в завалке при выплавке стали в ДСП-150. *Фундаментальные исследования*. 2006;(11):37–38.
Timofeev E.S., Kochetov A.I., Timofeeva A.S. Dependence of charge melting time on HBI in charge during steel smelting in EAF-150. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2006;(11): 37–38. (In Russ.).
20. Патент 2345152 RU. Способ получения губчатого железа для изготовления тонкого порошка / Довыденков В.А.; заявл. 07.05.2007; опубликовано 27.01.2009. Бюл. № 3.
21. Sean Boyle. 55+ Years of Innovation: Midrex's Journey in Direct Reduction Technology. *"Direct From Midrex" (Sep. 2025)*. [Electronic resource]. Available at URL: <https://www.midrex.com/company-news/140-8-mt-of-dri-produced-globally-in-2024/> (Accessed: 10.03.2026).
22. Филиппов С.И. Теория металлургических процессов. Москва: Металлургия; 1967:279.
23. Жуховицкий А.А., Шварцман Л.А. Физическая химия. Москва: Металлургия; 2001:687.
24. Кузнецов Ю.С., Михайлов Г.Г., Качурина О.И. Термодинамический анализ реакции водяного газа. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия»*. 2014;14(1):5–11.
Kuznetsov Yu.S., Mikhailov G.G., Kachurina O.I. Thermodynamic analysis of the water gas reaction. *Bulletin of the South Ural State University. Series "Metallurgy"*. 2014;14(1):5–11. (In Russ.).
25. Шаповалов А.Н. Теория металлургических процессов: Учебно-методическое пособие. Новотроицк: НФ НИТУ «МИСиС»; 2020:91.
26. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. Москва: Наука; 1987:201.
27. Устройство и проектирование доменных печей: учебное пособие / Л.И. Каплун, А.В. Малыгин, О.П. Онорин, А.В. Пархачев. Екатеринбург: УрФУ; 2016:219.
28. Бузоверя М.Т. Кинетические характеристики процесса восстановления в шахте доменной печи. *Сталь*. 1989;(1):17–21.
Buzoverya M.T. Kinetic characteristics of reduction process in a blast furnace shaft. *Stal'*. 1989;(1):17–21. (In Russ.).

29. Лисиенко В.Г., Лобанов В.И., Китаев Б.И. Теплофизика металлургических процессов: учебник для вузов. Москва: Юрайт; 2025:220.
30. Дмитриев А.Н. Математическое моделирование двумерных процессов в доменной печи. *Вычислительные методы и программирование*. 2004;5(1):252–267.
Dmitriev A.N. Mathematical modeling of two-dimensional processes in a blast furnace. *Vychislitel'nye metody i programmirovaniye*. 2004;5(1):252–267. (In Russ.).
31. Wu Y., Fan X., Ji Z., Gan M., Zhou H., Li H., Chen X., Zhao Y., Zhang R., Lai R. Investigation on the application of by-product steam in iron ore sintering: Performance and function mechanism. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022;29(41):62698–62709.
<https://doi.org/10.1007/s11356-022-20059-7>
32. Wang Y.-f., Yang T., Wang H.-y., Ding L. Application of steam injection in iron ore sintering: Fuel combustion efficiency and CO emissions. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2023;30(8):31–39.
<https://doi.org/10.1007/s42243-022-00793-5>
33. Sun C.-F., Zhou X.-G., Li G., Wang Y.-F., Xie X.-R., Lyu X.-W., Xu J. Intensive carbon combustion in sintering packed bed via steam spraying: An experimental study on carbon monoxide emission reduction. *Journal of Central South University*. 2023;30(3):786–799.
<https://doi.org/10.1007/s11771-023-5280-1>
34. Zhang Y., Pan W., Chen S., Ma H. Changes of SO₂, NO_x emission, and production of iron ore sintering with steam injection at the surface of sintering bed. In: *12th Int. Symp. on High-Temperature Metallurgical Processing. The Minerals, Metals & Materials Series*. Cham: Springer; 2022:459–467.
35. Сидорович В. Nippon Steel сократил выбросы в доменном процессе на треть в результате впрыскивания водорода. *RenEn*. 12.02.2024. [Электронный ресурс]. URL: <https://renen.ru/nippon-steel-sokratil-vybrosy-v-domennom-protsesse-na-tret-v-rezultate-vpryskivaniya-vodoroda/> (дата обращения: 26.06.2026).
36. Бигеев В.А., Сибатуллин С.К., Харченко А.С., Потапова М.В. Определение расхода водорода для твердофазного селективного восстановления комплексного железорудного сырья в лабораторных условиях. *Черные металлы*. 2021;(12):25–30.
<https://doi.org/10.17580/chm.2021.12.05>
Bigeev V.A., Sibagatullin S.K., Kharchenko A.S., Potapova M.V. Determination of hydrogen consumption for solid-phase selective reduction of complex iron ore raw materials in laboratory research. *Chernye metally*. 2021;(12):25–30. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/chm.2021.12.05>
37. Харченко А.С., Сибатуллина М.И., Чукин Д.М., Бигеев В.А. Возможность восстановления железа дополнительным водородом, вводимым в поток природного газа доменной плавки. *Черные металлы*. 2022;(12):17–23. <https://doi.org/10.17580/chm.2022.12.03>
Kharchenko A.S., Sibagatullina M.I., Chukin D.M., Bigeev V.A. Ability to reduce iron with additional hydrogen introduced into the blast-furnace natural gas stream. *Chernye metally*. 2022;(12):17–23.
<https://doi.org/10.17580/chm.2022.12.03>

Сведения об авторах

Information about the Authors

Сергей Григорьевич Мельник, д.т.н., профессор, старший научный сотрудник Высшей школы физики и технологий материалов Института машиностроения, материалов и транспорта, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
ORCID: 0000-0002-5550-4957
E-mail: melnik.sg@gmail.com

Павел Валерьевич Ковалев, к.т.н., доцент, заместитель директора по образовательной деятельности Института машиностроения, материалов и транспорта, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
ORCID: 0000-0003-1066-3812
E-mail: kovalev_pv@spbstu.ru

Владислав Иванович Бондарь, к.т.н., доцент кафедры «Теория металлургических процессов», Приазовский государственный технический университет
ORCID: 0009-0003-7189-7361
E-mail: bbvii.47@gmail.com

Сергей Владимирович Рябощук, старший преподаватель Высшей школы физики и технологий материалов Института машиностроения, материалов и транспорта, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
ORCID: 0000-0002-1183-8445
E-mail: ryaboshuk_sv@spbstu.ru

Ольга Вячеславовна Козьминская, к.т.н., доцент кафедры «Механика и прочность материалов и конструкций», Петербургский государственный университет путей сообщения императора Александра I
ORCID: 0000-0002-1933-9130
E-mail: olgakozm@list.ru

Sergei G. Mel'nik, Dr. Sci (Eng.), Prof., Senior Researcher of the Higher School of Physics and Technology of Materials, Institute of Mechanical Engineering, Materials and Transport, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
ORCID: 0000-0002-5550-4957
E-mail: melnik.sg@gmail.com

Pavel V. Kovalev, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Deputy Director for Educational Activities of the Institute of Mechanical Engineering, Materials, and Transport, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
ORCID: 0000-0003-1066-3812
E-mail: kovalev_pv@spbstu.ru

Vladislav I. Bondar', Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of Chair of Theory of Metallurgical Processes, Azov State Technical University
ORCID: 0009-0003-7189-7361
E-mail: bbvii.47@gmail.com

Sergei V. Ryaboshuk, Senior Lecturer of the Higher School of Physics and Materials Engineering, Institute of Mechanical Engineering, Materials, and Transport, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
ORCID: 0000-0002-1183-8445
E-mail: ryaboshuk_sv@spbstu.ru

Ol'ga V. Koz'minskaya, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of Chair of Mechanics and Strength of Materials and Structures, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
ORCID: 0000-0002-1933-9130
E-mail: olgakozm@list.ru

Алексей Андреевич Ананьев, магистрант Высшей школы физики и технологий материалов Института машиностроения, материалов и транспорта, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
E-mail: aleksei.ananjev.11v@gmail.com

Яна Олеговна Михайлова, аспирант Высшей школы физики и технологий материалов Института машиностроения, материалов и транспорта, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
ORCID: 0009-0007-7888-5856
E-mail: iao.mikhailova@severstal.com

Александр Анатольевич Чиянов, аспирант Высшей школы физики и технологий материалов Института машиностроения, материалов и транспорта, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
ORCID: 0009-0003-4002-2984
E-mail: chiyanov.aa@edu.spbstu.ru

Сергей Павлович Сёмин, студент, Петербургский государственный университет путей сообщения императора Александра I
E-mail: thrillpill37@gmail.com

Aleksei A. Anan'ev, MA Student of the Higher School of Physics and Materials Technology of the Institute of Mechanical Engineering, Materials and Transport, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
E-mail: aleksei.ananjev.11v@gmail.com

Yana O. Mikhailova, Postgraduate of the Higher School of Materials Physics and Technology of the Institute of Mechanical Engineering, Materials and Transport, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
ORCID: 0009-0007-7888-5856
E-mail: iao.mikhailova@severstal.com

Aleksandr A. Chiyanov, Postgraduate of the Higher School of Physics and Materials Technology, Institute of Mechanical Engineering, Materials and Transport, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
ORCID: 0009-0003-4002-2984
E-mail: chiyanov.aa@edu.spbstu.ru

Sergei P. Semin, Student, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
E-mail: thrillpill37@gmail.com

Вклад авторов

Contribution of the Authors

С. Г. Мельник – обзор литературы, анализ данных, написание текста.
П. В. Ковалев – обсуждение и анализ данных, редактирование текста.
В. И. Бондарь – подготовка и обсуждение данных, написание текста.
С. В. Рябощук – обзор и анализ литературных данных, редактирование текста.
О. В. Козьминская – редактирование текста, анализ данных.
А. А. Ананьев – получение и обработка данных, написание текста.
Я. О. Михайлова – анализ данных, написание и редактирование текста.
А. А. Чиянов – анализ данных, построение графиков, оформление статьи.
С. П. Сёмин – оформление статьи, построение графиков, редактирование текста.

S. G. Mel'nik – literary review, data analysis, writing the text.
P. V. Kovalev – data discussion and analysis, editing the text.
V. I. Bondar' – data preparation and discussion, writing the text.
S. V. Ryaboshuk – literary review and analysis, editing the text.
O. V. Koz'minskaya – editing the text, data analysis.
A. A. Anan'ev – data receiving and processing, writing the text.
Ya. O. Mikhailova – data analysis, writing and editing the text.
A. A. Chiyanov – data analysis, plotting graphs, article design.
S. P. Semin – article design, plotting graphs, editing the text.

Поступила в редакцию 18.07.2025
После доработки 11.03.2026
Принята к публикации 01.04.2026

Received 18.07.2025
Revised 11.03.2026
Accepted 01.04.2026