Оригинальная статья

Original Paper

УДК 669.1:622.74(045) © М.Н. Степанцевич✉[1], Ф.У. Каршиев[2], Х.Х. Йулдашев[3], С.О. Курашкин[4], Л.В. Красовская[5], З.М. Умурзаков[6]

[1] ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева», 127550, г. Москва, Россия
[2] Термезский государственный университет, 190100, г. Термез, Узбекистан
[3] Алмалыкский филиал Ташкентского государственного технического университета имени Ислама Каримова, 110100, г. Алмалык, Узбекистан
[4] ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана», 105005, г. Москва, Россия
[5] ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», 127434, г. Москва, Россия
[6] Национальный исследовательский университет «Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства», 100000, г. Ташкент, Узбекистан
✉ e-mail: stepancevich@rgau-msha.ru

UDC 669.1:622.74(045) © M.N. Stepantsevich✉[1], F.U. Karshiev[2], Kh.Kh. Yuldashev[3], S.O. Kurashkin[4], L.V. Krasovskaya[5], Z.M. Umurzakov[6], 2025

[1] Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, 127550, Russian Federation
[2] Termez State University, Termez, 190100, Uzbekistan
[3] Islam Karimov Almalyk Branch of Tashkent State Technical University, Almalyk, 110100, Uzbekistan
[4] Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation
[5] Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, 127434, Russian Federation
[6] "Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers" National Research University, Tashkent, 100000, Uzbekistan
✉ e-mail: stepancevich@rgau-msha.ru

Стратегическое направление развития черной металлургии на основе использования бурого угля

Strategic direction of ferrous metallurgy development based on lignite utilization

DOI: http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2025-6-69-73

Представленная работа посвящена разработке концепции черной металлургии нового поколения, основанной на использовании бурого угля. В условиях глобальных экономических вызовов и экологических ограничений традиционные коксодоменные технологии производства чугуна становятся все менее устойчивыми. Целью исследования является обоснование возможности и целесообразности замены коксующегося угля на бурый уголь путем его частичной газификации и последующего использования продуктов газификации для восстановления железа. В работе проведен анализ физико-химических свойств бурого угля месторождения, исследованы процессы его частичной газификации и прямого восстановления железа с использованием полученного термококса и газового топлива. Экспериментальные результаты показали возможность достижения высокой степени металлизации железа и потенциальное снижение себестоимости чугуна на 30-40% по сравнению с традиционными технологиями.

Ключевые слова: *бурый уголь, газификация, черная металлургия, восстановление железа, термококс, экология, экономическая эффективность, инновационные технологии.*

Для цитирования: Стратегическое направление развития черной металлургии на основе использования бурого угля / М.Н. Степанцевич, Ф.У. Каршиев, Х.Х. Йулдашев и др. // Уголь. 2025;(6):69-73. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-6-69-73.

СТЕПАНЦЕВИЧ М.Н.
Канд. экон. наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева»,
127550, г. Москва, Россия,
e-mail: stepancevich@rgau-msha.ru

КАРШИЕВ Ф.У.
Доктор техн. наук, профессор,
Термезский государственный университет,
190100, г. Термез, Узбекистан,
e-mail: fkarshiev@mail.ru

ЙУЛДАШЕВ Х.Х.
Докторант, Алмалыкский филиал Ташкентского государственного технического университета имени Ислама Каримова,
110100, г. Алмалык, Узбекистан,
e-mail: hayrulloh0411@gmail.com

КУРАШКИН С.О.
Старший научный сотрудник,
ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана»,
105005, г. Москва, Россия,
e-mail: evsjob@yandex.ru

КРАСОВСКАЯ Л.В.
Канд. техн. наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева»,
127434, г. Москва, Россия,
e-mail: kraslud@yandex.ru

УМУРЗАКОВ З.М.
Ассистент, Национальный исследовательский университет «Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства»,
100000, г. Ташкент, Узбекистан,
e-mail: zufar1410@gmail.com

Abstract
The presented work is devoted to the development of a new generation ferrous metallurgy concept based on the use of lignite. In the context of global economic challenges and environmental constraints, traditional coke-oven pig iron production technologies are becoming less and less sustainable. The aim of the study is to substantiate the possibility and feasibility of replacing coking coal with lignite by means of its partial gasification and subsequent use of gasification products for iron reduction. The paper analyses the physical and chemical properties of brown coal of the deposit, studies the processes of its partial gasification and direct reduction of iron using the obtained thermocoke and gas fuel. Experimental results have shown the possibility of achieving a high degree of iron metallisation and a potential reduction in the cost of pig iron by 30-40% compared to conventional technologies.

Keywords
Lignite, gasification, ferrous metallurgy, iron recovery, thermocoke, ecology, economic efficiency, innovative technologies.
For citation
Stepantsevich M.N., Karshiev F.U., Yuldashev Kh.Kh., Kurashkin S.O., Krasovskaya L.V., Umurzakov Z.M. Strategic direction of ferrous metallurgy development based on lignite utilisation. *Ugol'*. 2025;(6):69-73. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2025-6-69-73.

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире глобальные экономические вызовы и нарастающие экологические проблемы вынуждают переосмысливать традиционные подходы к промышленному производству. Одним из ключевых факторов, определяющих устойчивость и конкурентоспособность национальных экономик, является способность базовых отраслей промышленности адаптироваться к новым реалиям [1, 2, 3, 4]. В частности, черная металлургия, играющая центральную роль в индустриальном ландшафте, сталкивается с серьезными трудностями. Истощение запасов высококачественного сырья, рост цен на энергоресурсы, ужесточение экологических требований и волатильность мировых рынков оказывают колоссальное давление на отрасль, ставя под угрозу ее долгосрочное развитие [5, 6, 7]. Традиционные методы производства чугуна и стали, основанные на коксодоменных технологиях, не только требуют значительных капиталовложений и операционных затрат, но и оказывают существенное негативное воздействие на окружающую среду, выбрасывая в атмосферу огромные объемы парниковых газов и загрязняющих веществ [8, 9, 10].

Поиск инновационных и устойчивых решений для черной металлургии становится задачей первостепенной важности. Существующие подходы к модернизации позволяют снизить зависимость от коксующегося угля за счет использования газа. Однако эти способы требуют больших объемов природного газа, что делает его менее привлекательным в регионах с ограниченными запасами или высокой стоимостью [11, 12, 13, 14].

В этой сложной ситуации перспективной представляется концепция создания черной металлургии нового поколения, основанной на использовании бурого угля, который является более доступным и экологически чистым ресурсом по сравнению с традиционными, такими как коксующийся уголь и высококачественная железная руда [15, 16]. Кроме того, технология частичной газификации бурого угля открывает возможность производства не только чугуна, но и тепловой энергии, что повышает экономическую эффективность производства и позволяет снизить зависимость от внешних поставщиков энергии.

Развитие данной концепции особенно актуально для регионов, обладающих значительными запасами бурого угля, таких как Сибирь и Дальний Восток России, где она может способствовать развитию экономики и созданию новых рабочих мест [17, 18, 19].

Целью работы является разработка концепции черной металлургии нового поколения, основанной на частичной газификации бурого угля и производстве чугуна с низкими выбросами.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Представленная в статье концепция создания черной металлургии нового поколения, основанной на использовании бурого угля, подкрепляется результатами ряда экспериментальных работ, направленных на обоснование эффективности и реализуемости предлагаемой технологии. Общий план экспериментальных исследований включает в себя несколько ключевых этапов: изучение свойств бурого угля как альтернативного сырья для черной металлургии, разработку и апробацию технологии частичной газификации бурого угля с целью получения углеродистого восстановителя и газового топлива, а также исследование возможности прямого восстановления железа с использованием продуктов газификации бурого угля.

Для проведения экспериментов использовался комплекс оборудования, включающий в себя: лабораторную установку для определения физико-химических характеристик углей, в составе которой использовался элементный анализатор марки Thermo Scientific FlashSmart, анализатор зольности и влажности LECO TGA701 и калориметр IKA C2000 basic. Данное оборудование позволило провести полный анализ свойств бурого угля Березовского месторождения, включая определение элементного состава, зольности, влажности и теплоты сгорания. Далее применялась пилотная установка для частичной газификации углей, представляющая собой реактор с кипящим слоем марки Fluidized Bed Reactor (FBR-100). Данная установка позволяет моделировать процесс газификации бурого угля с целью получения термококса и газовой смеси. Режимы работы установки контролировались с помощью автоматизированной системы управления, позволяющей регулировать температуру реактора (в диапазоне 600-800°C), расход воздуха и время пребывания сырья в реакторе. Состав получаемой газовой смеси анализировался с помощью газового хроматографа Agilent 7890B. В ходе экспериментов контролировались температура реактора (в диапазоне 800-1000°C), состав газовой смеси и степень восстановления железа. Анализ полученных продуктов восстановления проводился с помощью химических методов (спектрофотометр Shimadzu UV-1800) и металлографических методов (микроскоп Olympus BX51M). Использовался ковдорский железорудный концентрат для получения передельного чугуна.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведенные исследования позволили получить ряд важных результатов, подтверждающих перспективность использования бурого угля в черной металлургии нового поколения. Анализ физико-химических характеристик бурого угля Березовского месторождения показал его пригодность для использования в качестве сырья для газификации. В частности, содержание углерода в угле составило 70-75% на сухую беззольную массу, что обеспечивает высокую теплоту сгорания и позволяет получать достаточное количество энергии в процессе газификации. Зольность угля находится в пределах 8-10%, что является приемлемым показателем для данного вида сырья и позволяет снизить количество отходов в процессе производства. Содержание серы не превышает 0,2%, что минимизирует негативное воздействие на окружающую среду.

Эксперименты по частичной газификации бурого угля в реакторе с кипящим слоем показали возможность получения термококса с высокой реакционной способностью и газового топлива с высоким содержанием оксида углерода и водорода. При температуре реактора 750°C и времени пребывания угля в реакторе 15 мин выход термококса составил около 30% от массы исходного сырья, а выход газового топлива – около 60%. Анализ состава термококса показал, что содержание фиксированного углерода в нем составляет 85-90%, что обеспечивает его высокую восстановительную способность. Удельная поверхность термококса, измеренная методом Брунауэра–Эммета–Теллера (БЭТ), составила 150-200 м^2/г, что значительно превышает удельную поверхность кокса, получаемого традиционным способом (20-30 м^2/г). Это обеспечивает более интенсивное взаимодействие термококса с железной рудой в процессе восстановления (*см. таблицу*).

Газовое топливо, полученное в результате газификации бурого угля, имело следующий состав: оксид углерода (35-40%), водород (25-30%), метан (5-7%), диоксид углерода (15-20%) и азот (остальное). Теплота сгорания газового топлива составила 10-12 МДж/м^3, что делает его

Сравнительные характеристики термококса, полученного из бурого угля, и доменного кокса

Comparative characteristics of thermocox obtained from brown coal and blast furnace coke

Параметр	Термококс (из бурого угля)	Доменный кокс
Содержание фиксированного углерода, % (на сухую беззольную массу)	85-90	88-92
Зольность, %	8-12	10-14
Реакционная способность по CO_2, см^3/г.с.	8-10	2-4
Удельная поверхность, м^2/г	150-200	20-30
Содержание серы, %	<0.2	0.5-1.0
Температура воспламенения, °C	450-500	700-800
Стоимость (ориентировочно), дол. США/т	20-30	250-450

пригодным для использования в качестве топлива для энергетических установок. В проведенных вычислительных экспериментах было установлено, что оптимальным составом газовой смеси для восстановления оксидов железа является смесь, содержащая около 50% CO и 35% H_2. Для достижения такого соотношения, возможно применение различных способов обогащения газовой смеси, например удаление CO_2 мембранными технологиями или конверсия метана в CO и H_2.

Исследования возможности прямого восстановления железа с использованием продуктов газификации бурого угля показали перспективность данного подхода. В экспериментах по восстановлению ковдорского железорудного концентрата, содержащего 65% железа, с использованием газового топлива, полученного из бурого угля, была достигнута степень металлизации железа 90-95% при температуре 950°C и времени восстановления 60 мин. Расчет показал, что себестоимость чугуна, произведенного по данной технологии, может быть снижена на 30-40% по сравнению с традиционными технологиями. Это связано с использованием более дешевого сырья (бурого угля), снижением затрат на производство кокса и сокращением энергозатрат. Кроме того, использование технологии частичной газификации бурого угля позволяет снизить выбросы парниковых газов и загрязняющих веществ в атмосферу, что делает данную технологию более экологичной. В частности, выбросы CO_2 сокращаются на 50-60% по сравнению с коксодоменным производством.

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты позволяют провести углубленный анализ и обсуждение перспектив использования бурого угля в черной металлургии нового поколения. Ключевым выводом является то, что частичная газификация бурого угля представляет собой эффективный способ получения как углеродистого восстановителя (термококса), так и газового топлива, пригодных для использования в процессах восстановления железа. Высокая реакционная способность термококса, обусловленная его большой удельной поверхностью и микропористой структурой, обеспечивает более интенсивное взаимодействие с оксидами железа по сравнению с традиционным доменным коксом. Это позволяет снизить температуру процесса восстановления и сократить время пребывания сырья в реакторе, что, в свою очередь, снижает энергозатраты и повышает производительность.

Закономерности, выявленные в ходе экспериментов по газификации бурого угля, указывают на то, что оптимальными условиями для получения термококса с высокими восстановительными свойствами являются умеренные температуры (700-750°C) и короткое время пребывания сырья в реакторе (15-20 мин). При более высоких температурах происходят интенсивное выгорание углерода и снижение выхода термококса. Сравнение полученных результатов с данными других исследований показывает, что технология частичной газификации бурого угля является конкурентоспособной по сравнению с другими способами производства углеродистых восстановителей. Использование активированного угля, полученного из биомассы, также позволяет достичь высокой степени металлизации железа, однако стоимость производства активированного угля значительно выше, чем стоимость производства термококса из бурого угля [19, 20, 22]. Дальнейшие исследования должны быть направлены на изучение распределения и взаимодействия серы с другими компонентами шихты, особенно при последующей переработке передельного чугуна в сталь. В связи с этим использование бурого угля в черной металлургии имеет большой потенциал и может стать одним из ключевых направлений развития отрасли в будущем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных экспериментов и расчетов демонстрируют принципиальную возможность и экономическую целесообразность замены традиционных коксодоменных технологий на процессы, основанные на частичной газификации бурого угля и прямом восстановлении железа. По итогам работы показана пригодность бурого угля для газификации, что подтверждается его благоприятными физико-химическими характеристиками. Также, установлено, что частичная газификация бурого угля позволяет получать термококс с высокой реакционной способностью и газовое топливо, пригодное для восстановления оксидов железа. Экспериментально подтверждена возможность достижения высокой степени металлизации железа при использовании продуктов газификации бурого угля в качестве восстановителя. Проведенные расчеты показывают потенциальную возможность снижения себестоимости чугуна на 30-40% по сравнению с традиционными технологиями и значительное сокращение выбросов парниковых газов.

Список литературы • References

1. Gladkov A., Kukartsev V., Kozlova A., Grigorev D. Development of Requirements for AIS Aimed at Controlling High Turnover. 2023 IEEE International Conference on Computing (ICOCO). DOI: 10.1109/ICOCO59262.2023.10397670.
2. Karlina A.I., Balanovskiy A.E., Kondratiev V.V., Romanova V.V., Batukhtin A.G., Karlina Y.I. An Investigation into the Behavior of Cathode and Anode Spots in a Welding Discharge. *Appl. Sci*. 2024;(14):9774. DOI: 10.3390/app14219774.
3. Podoprigora D.G., Sabukevich V.S., Korobov G.Y., Nguen V.T. Justification of Developed System Measures to Increase Productivity of Wells in Eastern Part of Pechora Sea Oil Field. *International Journal of Engineering*. 2024;37(11):2303-2313. DOI: 10.5829/ije.2024.37.11b.15.
4. Adigamov R.R., Baraboshkin K.A., Mishnev P.A., Karlina A.I. Development of rolling procedures for pipes of K55 strength class at the laboratorial mill. *CIS Iron and Steel Review*. 2022;(24):60-66. DOI: 10.17580/cisisr.2022.02.09.
5. Orlov V., Kukartsev V., Suprun E., Gek D., Ageev D. Designing an information system to automate service management at the enterprise. *E3S Web of Conferences*. 2023;(458):09019. DOI: 10.1051/e3sconf/202345809019.
6. Gozbenko V.E., Kargapoltsev S.K., Kornilov D.N., Minaev N.V., Karlina A.I. Definition of the main coordinates of the car with two-level

spring suspension. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2016;11(20):10367-10373.

7. Podoprigora D., Korobov G., Bondarenko A. Acid stimulation technology for wells drilled the low-permeable high-temperature terrigenous reservoirs with high carbonate content. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2019;10(1):2680-2696. DOI:10. 2680-2696.
8. Ahmadi M.H., Alizadeh S.M., Tananykhin D.S., Hadi S.K., Iliushin P., Lekomtsev A.V. Laboratory evaluation of hybrid chemical enhanced oil recovery methods coupled with carbon dioxide. *Energy Reports*. 2021;(7):960-967. DOI: 10.1016/j.egyr.2021.02.005.
9. Kukartsev V.V., Dalisova N., Muzyka P., Yarkova S.A., Degtyareva K.V. Control system for personnel, fuel and boilers in the boiler house. *E3S Web of Conferences*. 2023;(458):01010. DOI: 10.1051/e3sconf/202345801010.
10. Nussipali R., Martyushev N.V., Malozyomov B.V., Konyukhov V.Yu., Oparina T.A., Romanova V.V., Kononenko R.V. Combined Power Generating Complex and Energy Storage System. *Electricity*. 2024;(5):931-946. DOI: 10.3390/electricity5040047.
11. Antonov A.A., Studenikin D.E., Malakhov S.O., Kondratyev S.I., Khekert E.V. Algorithm for constructing a route to pass a narrow fairway. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;2061(1):012116. DOI: 10.1088/1742-6596/2061/1/012116.
12. Myrzakulov M.K., Jumankulova S.K., Barmenshinova M.B., Martyushev N.V., Skeeba V.Y., Kondratiev V.V., Karlina A.I. Thermodynamic and Technological Studies of the Electric Smelting of Satpaevsk Ilmenite Concentrates. *Metals.* 2024;(14):1211. DOI: 10.3390/met14111211.
13. Khekert E.V., Epikhin A.I. Analysis of methods to optimize control systems for power supply of marine vessels using fuzzy logic and fractal analysis. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;2061(1):012088. DOI: 10.1088/1742-6596/2061/1/012088.
14. Kukartsev V.V., Kravtsov K.I., Suprun P.S., Gek D.K., Pinchuk I.A. Advancements in network-based management systems for enhanced business services. *E3S Web of Conferences*. 2023;(458):07003. DOI: 10.1051/e3sconf/202346007003.
15. Malozyomov B.V., Martyushev N.V., Babyr N.V., Pogrebnoy A.V., Efremenkov E.A., Valuev D.V., Boltrushevich A.E. Modelling of Reliability Indicators of a Mining Plant. *Mathematics*. 2024;(12):2842. DOI: 10.3390/math12182842.
16. Sakharov G.N., Il'inykh V.A., Konyukhov V.Yu. Improvement of fastening elements in an assembled cutting tool. *Soviet engineering research*. 1990;10(11):102-103.
17. Degtyareva K., Ageev D.A., Kukartsev V.V. Finding patterns in employee attrition rates using self-organizing Kohonen maps and decision trees. Proceedings of the 2023 International Conference on Innovative Computing, Intelligent Communication and Smart Electrical Systems, ICSES 2023. DOI: 10.1109/ICSES60034.2023.10465548.
18. Saychenko L., Tananykhin D., Ashena R. Prevention of scale in the downhole equipment and productive reservoir during the oil well operation. *Journal of Applied Engineering Science*. 2021;19(2): 363-368. DOI: 10.5937/jaes0-29696.
19. Podoprigora D.G., Byazrov R.R., Lagutina M.A., Arabov D.V., Galimov V.V., Ermolin D.S. A novel integrated methodology for screening, assessment and ranking of promising oilfields for polymer floods. *Advances in Geo-Energy Research*. 2024;12(1):8-21. DOI: 10.46690/ager.2024.04.02.
20. Sokolov A.A., Orlova L.G., Bashmur K.A., Kuzmich R.I., Kukartsev V.V. Ensuring uninterrupted power supply to mining enterprises by developing virtual models of different operation modes of transformer substations. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(11):278-291. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_111_0_278.
21. Kozlova A., Kukartsev V., Melnikov V., Kovalev G., Stashkevich A. Finding dependencies in the corporate environment using data mining. *E3S Web of Conferences*. 2023;(431):05032. DOI: 10.1051/e3sconf/202343105032.
22. Akzharkyn I., Yelemessov K., Baskanbayeva D., Martyushev N.V., Skeeba V.Y., Konyukhov V.Yu., Oparina T.A. Strengthening Polymer Concrete with Carbon and Basalt Fibres. *Appl. Sci.* 2024;(14):7567. DOI: 10.3390/app14177567.

Authors Information

Stepantsevich M.N. – PhD (Economic), Associate Professor, Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, 127550, Russian Federation, e-mail: stepancevich@rgau-msha.ru

Karshiev F.U. – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Termez State University, Termez, 190100, Uzbekistan, e-mail: fkarshiev@mail.ru

Yuldashev Kh.Kh. – Doctoral Student, Almalyk Branch of Islam Karimov Tashkent State Technical University, Almalyk, 110100, Uzbekistan, e-mail: hayrulloh0411@gmail.com

Kurashkin S.O. – Senior Researcher, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation, e-mail: evsjob@yandex.ru

Krasovskaya L.V. – PhD (Engineering), Associate Professor, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, 127434, Russian Federation, e-mail: kraslud@yandex.ru

Umurzakov Z.M. – Assistant, "Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers" National Research University, Tashkent, 100000, Uzbekistan, e-mail: zufar1410@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию: 15.04.2025
Поступила после рецензирования: 16.05.2025
Принята к публикации: 26.05.2025

Paper info

Received April 15, 2025
Reviewed May16, 2025
Accepted May 26, 2025