



УДК 669.1

DOI 10.17073/0368-0797-2026-1-6-13



Оригинальная статья

Original article

ДОСТИЖЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ АГЛОДОМЕННОГО ПОДРАЗДЕЛЕНИЯ ПАО «СЕВЕРСТАЛЬ»

Е. Н. Виноградов¹, Л. И. Леонтьев^{2,3,4}, А. А. Калько¹

¹ ПАО «Северсталь», Череповецкий металлургический комбинат (Россия, 162608, Вологодская область, Череповец, ул. Мира, 30)

² Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина (Россия, 105005, Москва, ул. Радио 23/9, стр. 2)

³ Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (Россия, 119049, Москва, Ленинский пр., 4)

⁴ Президиум РАН (Россия, 119991, Москва, Ленинский пр., 32а)

✉ envinogradov@severstal.com

Аннотация. В статье приводится краткое описание металлургического производства ПАО «Северсталь», демонстрируется практический опыт уменьшения расхода сухого скипового кокса за период 2014 – 2024 гг. с 415 до 350 кг/т чугуна, т. е. на 15,7 абс. %. Авторы сформулировали направления исследований и задач по корректировке технологии для обеспечения сокращения удельного расхода твердого углеродного топлива за счет замены кокса и его твердых углеродных заменителей на вдуваемый природный газ, улучшения металлургических свойств железорудной шихты, оптимального уровня использования вторичных ресурсов в шихте. В статье представлены результаты лабораторных исследований процессов формирования жидких фаз при проплавке рядовых (4,9 – 7,2 % SiO₂) и низкокремнистых (2,8 – 3,0 % SiO₂) окатышей. Уровень температуры в зоне размягчения, полная потеря газопроницаемости слоя железной руды и капельный поток первичных шлаковых расплавов в окатышах с низким содержанием кремнезема увеличиваются на 45 – 50 °С по сравнению с рядовыми окатышами. На основании исследований проб кокса, отобранных в действующих доменных печах на глубине 10 – 12 м от уровня засыпи шихты и в фурменных очагах, был сделан вывод о возможности применения твердого топлива с увеличенной реакционной способностью в условиях выплавки чугуна с низкой щелочной нагрузкой (уменьшенной с 3,2 до 2,8 кг/т чугуна). По результатам лабораторных исследований было установлено влияние различных составов восстановительных газов с переменным содержанием водорода на процесс восстановления агломерата и окатышей. Показатель восстановимости R_f возрастает на 2,5 – 3,0 % при увеличении содержания водорода на каждые 5,0 % в составе газовой смеси. Определен показатель расхода углерода при выплавке чугуна в доменных печах, представлены результаты снижения данного показателя на 12,4 кг/т чугуна (3,0 отн. %) за период 2014 – 2023 гг. Статья описывает направления развития первого передела ПАО «Северсталь», включающие поэтапный отказ от агломерационного передела с увеличением доли окатышей в доменной шихте до 90 %, сокращением расхода кокса в доменной плавке до уровня 270 кг/т чугуна и увеличением расхода природного газа до 300 м³/т чугуна.

Ключевые слова: доменная печь, ПАО «Северсталь», расход твердого топлива, природный газ, железорудные материалы, показатель восстановимости R_f , кокс, показатель CSR, отсеб железорудных материалов фракции 3 – 5 мм, водород, расход углерода при выплавке чугуна в доменных печах, продолжительность кампании, направления развития

Для цитирования: Виноградов Е.Н., Леонтьев Л.И., Калько А.А. Достижения и перспективы развития аглодоменного подразделения ПАО «Северсталь». *Известия вузов. Черная металлургия*. 2026;69(1):6–13. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2026-1-6-13>

ACHIEVEMENTS AND DEVELOPMENT PROSPECTS OF SINTERING AND BLAST FURNACE DIVISION OF PJSC SEVERSTAL

E. N. Vinogradov¹ , L. I. Leont'ev^{2, 3, 4}, A. A. Kal'ko¹

¹ PJSC Severstal, Cherepovets Steel Mill (30 Mira Str., Cherepovets, Vologda Region 162608, Russian Federation)

² I.P. Bardin Central Research Institute of Ferrous Metallurgy (23/9 Radio Str., Moscow 105005, Russian Federation)

³ National University of Science and Technology "MISIS" (4 Leninskii Ave., Moscow 119049, Russian Federation)

⁴ Scientific Council on Metallurgy and Metal Science of the Russian Academy of Sciences (Department of Chemistry and Material Sciences) (32a Leninskii Ave., Moscow 119991, Russian Federation)

 envinogradov@severstal.com

Abstract. The paper provides a brief description of the metallurgical process at PJSC Severstal, demonstrates the practical experience of reducing the consumption of dry skip coke from 415 to 350 kg/t of pig iron over the period 2014 – 2024, a decrease of 15.7 abs. %, and identifies the potential for further reduction of solid fuel consumption in blast furnace smelting. Research directions and tasks were formulated to adjust the technology in order to reduce the specific consumption of solid carbon fuel (including by replacing coke and its solid carbon substitutes with injected natural gas), improve the metallurgical properties of iron ore charges, and determine the optimal level of secondary resources use in the charge. The authors presented the results of laboratory studies of the processes of liquid phase formation during the melting of ordinary (SiO₂ content 4.9 – 7.2 %) and low-silica (SiO₂ content 2.8 – 3.0 %) pellets. The temperature level of the softening zone, complete loss of gas permeability of the iron ore layer, and drip flow of primary slag melts in low-silica pellets increases by 45 – 50 °C compared to ordinary pellets. The article considers the production results of using 3 – 5 mm iron ore screening directly in the blast furnace process (200,000 tons, or 22.3 kg/t of pig iron in 2017). Based on the results of the studies of coke samples taken from operating blast furnaces at a depth of 10 – 12 m from the charge level and in the tuyere zones, it was concluded that it is possible to use solid fuel with increased reactivity in conditions of iron smelting with a low alkali load (reduced from 3.2 kg/t of pig iron to 2.8 kg/t of pig iron). Based on laboratory studies, the effect of various compositions of reducing gases with variable hydrogen content on the reduction process of sinter and pellets was established. The reduction factor (R_f , %) increases by 2.5 – 3.0 % for every 5.0 % increase in hydrogen content in the gas mixture. The indicator “carbon consumption during ironmaking in blast furnaces” was determined, which allows to assess the real efficiency of blast furnace smelting from the point of view of the climate agenda, and the results of reducing this indicator by 12.4 kg/t of iron (3.0 rel. %) for the period of 2014 – 2023 were presented. The authors formulated the directions for the development of PJSC Severstal first processing stage, including the gradual abandonment of the sintering stage with an increase in the share of pellets in the blast furnace charge to 90 %, a reduction in consumption of coke in the blast furnace to 270 kg/t of pig iron, and an increase in the consumption of gas-based coke substitute (natural gas) to 300 m³/t of pig iron.

Keywords: blast furnace, PJSC Severstal, solid fuel consumption, natural gas, iron ore materials, reduction factor (R_f , %), coke, CSR factor, screening of iron ore materials with a size of 3 – 5 mm, hydrogen, carbon consumption during iron smelting in blast furnaces, campaign duration, development direction

For citation: Vinogradov E.N., Leont'ev L.I., Kal'ko A.A. Achievements and development prospects of sintering and blast furnace division of PJSC Severstal. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2026;69(1):6–13. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2026-1-6-13>

ВВЕДЕНИЕ

Крупная вертикально интегрированная горно-металлургическая компания под давлением конкуренции и внешних вызовов, связанных с климатической повесткой, обязана обеспечить поиск путей реализации экономически обоснованного способа сокращения удельных выбросов парниковых газов при производстве стали, сохраняя и увеличивая отрыв по себестоимости продукции от ближайших конкурентов.

Дивизион «Северсталь Российская Сталь» ПАО «Северсталь» является одним из крупнейших производителей в России и представляет собой предприятие мирового уровня, которое производит более 11 млн т стали в год. Первый передел представлен коксоагло-доменным производством, имеющим в своем составе восемь действующих коксовых батарей (семь с гравитационной загрузкой и одна с трамбованием угольной шихты), пять агломерационных машин и пять доменных печей (от 1007 до 5500 м³ полезного объема). Выплавка стали из перedelного чугуна осуществляется в метал-

лургическом производстве тремя кислородными конвертерами (объемом 420 т), а также дуговой и шахтной электропечами (объемом 150 т каждая). Состав оборудования позволяет осуществлять выплавку как рядовых, так и ответственных марок стали для отраслей строительства, энергетики и машиностроения.

Производство жидкого чугуна в доменных печах в мире до сих пор занимает преобладающее положение в качестве способа снабжения металлом агрегатов для кислородного производства стали [1]. Задача повышения эффективности первого передела сводится к разработке способа обеспечения сталеплавильных мощностей необходимым количеством первичного металлического расплава с заданным уровнем качественных характеристик, низкой себестоимостью и минимально возможным уровнем эмиссии парниковых газов.

Теоретический предел удельного расхода кокса в доменной плавке, определяемый с точки зрения обеспечения противотока восстановительных газов и жидких продуктов плавки, оценивается в достаточно

широком диапазоне от 150 до 250 кг/т чугуна в зависимости от подготовки железорудного сырья, выхода шлака и горячей прочности кокса [2; 3]. На стыке XX и XXI веков фактический расход сухого скипового кокса на выплавку чугуна в диапазоне 415 – 450 кг/т чугуна считался для отечественных металлургов приемлемым уровнем, и уровень 250 кг/т чугуна для практикующих доменщиков выглядел именно теоретической, недостижимой абстракцией. Развитие науки и технологии в части повышения качественных характеристик кокса, применения его заменителей, подготовки железорудной шихты, совершенствования систем контроля и управления доменной плавкой позволили за десятилетие (2014 – 2024 гг.) для доменных печей (ДП) ПАО «Северсталь» в среднем по цеху сократить данный показатель с 415 до 350 кг/т чугуна, т. е. примерно на 15,7 абс. %. Такое существенное сокращение достигнуто без каких-либо значимых изменений в конструкциях доменных печей, а в основном за счет подбора эффективной технологии ведения доменной плавки. Изменение удельных расходов твердого (сумма скипового кокса и его твердых заменителей) и газообразного (природный газ (ПГ)) топлива при выплавке чугуна в ПАО «Северсталь» в указанном периоде представлено на рис. 1. Наилучшие из достигнутых среднемесячных показателей составляют 301,1 кг кокса + 206,8 м³ ПГ на 1 т чугуна для ДП № 1 (полезный объем 1007 м³) и 307,4 кг кокса + 214,2 м³ ПГ на 1 т чугуна для ДП № 3 (полезный объем 3200 м³).

На сегодняшний день сохраняется нереализованный потенциал снижения расхода кокса при выплавке чугуна в доменных печах на уровне от 100 до 200 кг/т чугуна (т. е. диапазон 28,6 – 57,1 абс. %) от уровня теоретического минимума. Для реализации экономически обоснованного сокращения удельного расхода твердого углеродного топлива (в том числе за счет замены кокса и его твердых углеродных заменителей на ддуваемый природный газ) необходимо улучшение металлурги-

ческих свойств доменной шихты и твердого топлива, применение оптимального, технологически и экономически обоснованного уровня использования вторичных ресурсов в шихте.

Исследования влияния повышения содержания железа в доменной шихте на технико-экономические показатели доменного процесса, проведенные в 60 – 70-х годах XX века, показали, что каждый процент повышения содержания железа ($Fe_{общ}$) приводит к сокращению расхода кокса на 1,0 – 1,5 % и увеличению производительности на 1,7 – 2,2 % [4]. В то время удельный расход сырья в доменной шихте отечественных предприятий составлял ~ 1700 – 1920 кг/т чугуна, а содержание диоксида кремния (SiO_2) в агломератах отечественных и зарубежных предприятий находилось в пределах 6,5 – 11,0 %, в окатышах на 1,5 – 2,0 % ниже [5; 6]. Развитие технологий обогащения и использование богатых железом концентратов и аглоруд существенно повлияло на процессы, протекающие в доменной печи, и обусловило необходимость проведения исследований комплекса металлургических свойств доменной шихты с пониженным содержанием SiO_2 . В работах специалистов по доменному производству было показано, что процессы формирования расплавов из агломератов и окатышей имеют принципиальные отличия [7; 8]. Изучение влияния увеличения содержания железа в доменной шихте при различных способах окускования на процессы восстановления, плавления и капельного течения расплава агломерата и окатышей через слой кокса различной реакционной способности необходимо для выявления устойчивых закономерностей процессов формирования шлаковых и металлоуглеродистых расплавов при оптимизации состава шихты. Выполненная сравнительная оценка качества рядовых (4,9 – 7,2 % SiO_2) и низкремнистых (2,8 – 3,0 % SiO_2) окатышей в ходе лабораторных исследований процессов формирования жидких фаз при проплавке шихты показала, что температурный уровень

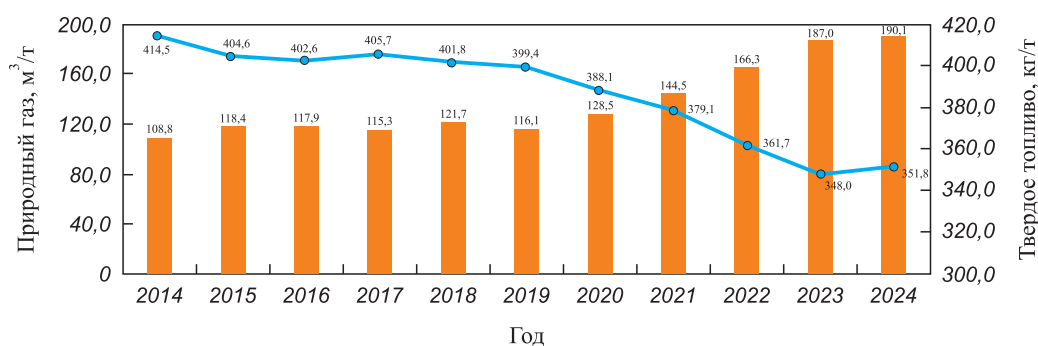


Рис. 1. Изменение удельных расходов твердого и газообразного топлива при выплавке чугуна в доменных печах ПАО «Северсталь» в 2014 – 2024 гг.:
■ – природный газ, м³/т; — – твердое топливо, кг/т

Fig. 1. Changes in specific consumption of solid and gaseous fuel during iron smelting in blast furnaces of PJSC Severstal in 2014 – 2024:
■ – natural gas, m³/t; — – solid fuel, kg/t

зоны размягчения, полной потери газопроницаемости железорудного слоя и капельного течения первичных шлаковых расплавов у низкремнистых окатышей по сравнению с рядовыми повышается на 45 – 50 °С. Это приводит к увеличению объема сухой зоны доменной печи и повышению восстановимости железорудного сырья. Дополнительно в ходе промышленных испытаний было установлено, что содержание железа общего в низкремнистых окатышах при равной основности повысилось на 2,6 %, а содержание щелочных элементов снизилось на 0,05 %, что при содержании окатышей в составе доменной шихты 32 – 34 % привело к уменьшению щелочной нагрузки примерно на 0,28 – 0,30 кг/т чугуна и, соответственно, сокращению расхода кокса на 3,0 – 3,4 кг/т чугуна.

Необходимо отметить, что положительным фактором при росте доли окатышей является существенное увеличение порозности доменной шихты [9]. Расчеты показывают, что повышение доли окатышей с 35 до 100 % дает рост порозности слоя железорудных материалов в сухой зоне доменной печи на 17,2 отн. %. Данный факт позволяет прогнозировать улучшение степени использования восстановительных газов в процессе плавки и, следовательно, дает возможность нарастить уровень применения газообразных заменителей кокса.

Отсев железорудных материалов, образующийся в результате грохочения агломерата и окатышей в доменном производстве, на современных металлургических предприятиях повторно вовлекается в технологический процесс получения чугуна двумя способами – в составе возврата в агломерационном производстве и в составе шихты для доменных печей. Влияние возврата на производительность и качество агломерата неоднозначно [10; 11]. По возможности, его количество в процессе спекания агломерата должно быть снижено. Рациональным направлением является использование отсева железорудных материалов непосредственно в доменном процессе. Разработан способ загрузки в доменную печь отсеянных фракций агломерата и окатышей, регламентирующий количество и периодичность загрузки этого компонента [12]. Практическое применение данного способа позволило в 2017 г. использовать в доменной плавке более 200 тыс. т железорудного отсева фракции 3 – 5 мм, что составило 22,3 кг/т чугуна.

Подбор углей, расширение сырьевой базы и технологических возможностей коксования, получение продуктов с заданными свойствами, сочетающих оптимальные экономические и технологические показатели, являются основными направлениями для развития коксохимического производства. В целом поведение кокса в доменной печи может характеризоваться рядом этапов трансформации его состава и свойств, которые по мере опускания кокса в печи изменяются под воздействием тепловых, физико-химических и механи-

ческих условий плавки. В условиях реальной плавки наиболее точную и достоверную оценку качественного потенциала используемого кокса дает его состояние в пробе, извлеченной из действующей доменной печи. Для исследования характеристик фурменного кокса на доменных печах ПАО «Северсталь» при замене фурменных приборов на остановках были отобраны пробы кокса на уровне фурм. Так же, с целью изучения влияния щелочей на характеристики кокса, в условиях суммарной щелочной нагрузки ($K_2O + Na_2O$) в диапазоне 2,8 – 3,0 кг/т чугуна были выполнены отборы проб кокса из шахты ДП № 4 на глубине 10 – 12 м от уровня засыпи шихты. Результаты исследований позволили сделать заключение о том, что в условиях выплавки чугуна с низкой щелочной нагрузкой (уменьшенной с 3,2 до 2,8 кг/т чугуна, т. е. на 0,4 кг/т чугуна), открывается перспектива применения твердого топлива с увеличенной реакционной способностью. Развитием данного направления стала разработка и реализация в условиях ПАО «Северсталь» нового способа получения инновационного продукта углеродсодержащего с заданными характеристиками из углей, условно пригодных для коксования (60 – 100 % в составе угольной шихты) в процессе слоевого коксования в коксовых батареях с гравитационной загрузкой [13].

Разработка необходимых технологических мероприятий по замене части кокса на природный газ предполагает определение и учет содержащихся в последнем восстановительных компонентов и величину теплового эффекта его превращения в фурменной зоне доменной печи. Многочисленные исследования [14; 15], проведенные по разработке технологии ведения доменной плавки на комбинированном дутье, позволили установить технические показатели, необходимые для определения рационального количества природного газа. В качестве таких показателей наиболее часто используются такие параметры, как теоретическая температура газа у фурм [16 – 18], учитывающая совместный процесс горения углерода, кокса, природного газа и коэффициент замены кокса природным газом [19]. Повышенный расход природного газа приводит к увеличению доли водорода в газах доменных печей, что требует существенных изменений в технологии доменной плавки. Так, на основе лабораторных исследований установлено влияние различных составов восстановительных газов с переменным содержанием водорода на процесс восстановления агломерата и окатышей. Показано, что показатель восстановимости увеличивается на 2,5 – 3,0 % при увеличении содержания водорода на каждые 5 % в составе газовой смеси, что подтверждает целесообразность увеличения расхода природного газа при выплавке чугуна. На практике данные результаты были применены при освоении технологии выплавки чугуна с увеличенным расходом природного газа в диапазоне 140 – 250 м³/т и повышением доли окатышей в составе железорудной части шихты с уровня 32

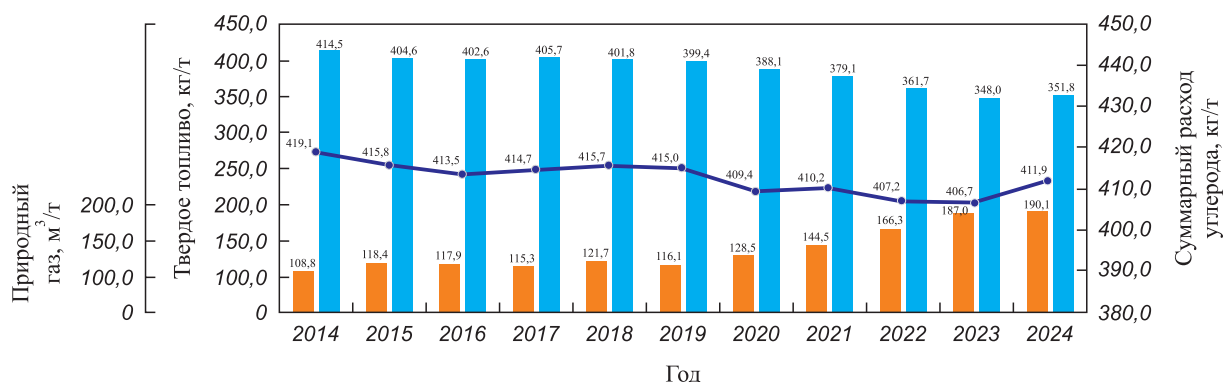


Рис. 2. Изменение удельных расходов твердого, газообразного топлива и расход углерода при выплавке чугуна в доменных печах ПАО «Северсталь» в 2014 – 2024 гг.:

■ – природный газ, м³/т; ■ – твердое топливо, кг/т; — – суммарный расход углерода при выплавке чугуна, кг/т

Fig. 2. Changes in specific consumption of solid and gaseous fuel and carbon consumption during iron smelting in blast furnaces of PJSC Severstal in 2014 – 2024:

■ – natural gas, m³/t; ■ – solid fuel, kg/t; — – total carbon consumption during pig iron smelting, kg/t

до 60 %. Разработан и внедрен в производство способ ведения доменной плавки с увеличенным расходом природного газа в диапазоне 140 – 250 м³/т чугуна по сравнению с исходным уровнем 110 – 140 м³/т чугуна [20]. За период 2021 – 2023 гг. удельный расход природного газа в целом по цеху производства чугуна ПАО «Северсталь» составил более 190 м³/т чугуна при расходе твердого топлива менее 350 кг/т чугуна с коэффициентом замены кокса природным газом 0,704 кг/м³.

В настоящее время в практику управления технологическими процессами ПАО «Северсталь» введен показатель «расход углерода при выплавке чугуна в доменных печах», который позволяет оценить реальную эффективность доменной плавки с точки зрения климатической повестки. Данный показатель рассчитывается как сумма масс углерода, вносимого в доменную плавку с компонентами твердого топлива, вдуваемого природного газа и железорудной части шихты, отнесенная к массе выплавленного чугуна. Расход углерода при выплавке чугуна в доменных печах за период 2014 – 2023 гг. снижен на 12,4 кг/т чугуна (3,0 отн. %), что в пересчете на углекислый газ дает величину 45,5 кг CO₂/т чугуна (рис. 2).

В настоящее время удельный расход твердого топлива на выплавку чугуна 250 кг/т чугуна из разряда теоретической абстракции переходит в категорию целевого ориентира и результата, требующего достижения. Основанием для такого оптимизма служат успешное освоение технологий производства высококачественного кокса из трамбованной угольной шихты, применения сверхвысокого (более 200 м³/т чугуна) расхода природного газа и использования высокой доли окатышей в доменной шихте.

Необходимо отметить, что в ПАО «Северсталь» значительное внимание уделяется задаче продления межремонтного периода эксплуатации металлургических агрегатов [21; 22]. На основании анализа общего

состояния огнеупоров доменных печей, исследованного в период остановок на капитальные ремонты первого разряда, были определены наиболее подверженные износу участки футеровки, а также разработаны и внедрены технологические мероприятия, позволяющие:

- защитить поверхность огнеупора слоем гарнисажа, который воспринимает размывающее действие расплава, изолирует огнеупор и элементы системы охлаждения от контакта с жидкостью и горячим газом;

- управлять свойствами жидких продуктов плавки, как химическими (агрессивностью по отношению к гарнисажу и футеровке), так и физическими (температурой и скоростью движения по отношению к конструктиву печи);

- формировать столб шихты в доменных печах, который позволяет решать одновременно проблемы гарнисажеобразования в шахте и формирования коксовой насадки в горне с максимальной проницаемостью для жидкости.

Состояние огнеупорной футеровки и элементов систем охлаждения ДП № 4, 5 после выдувки на капитальные ремонты первого разряда представлено на рис. 3.

Реализация вышеуказанных мероприятий позволила в условиях изменения технологии ведения доменной плавки, изменения состава доменной шихты и практически полуторакратного наращивания замены кокса природным газом продлить срок эксплуатации ДП № 5 (крупнейшей в Европе, полезный объем 5500 м³) до 17,5 лет и выплавить на ней 75,2 млн т чугуна [11]. На ДП № 4 (полезный объем 2700 м³) завершившаяся в 2025 г. кампания продолжительностью 19,5 лет позволила произвести более 46 млн т чугуна. Достигнутые результаты позволяют с уверенностью рассчитывать в будущем на длительный (20 – 30 лет) срок эксплуатации доменных печей, как высокоэффективных агрегатов по производству первичного металлического расплава для сталеплавильного передела.

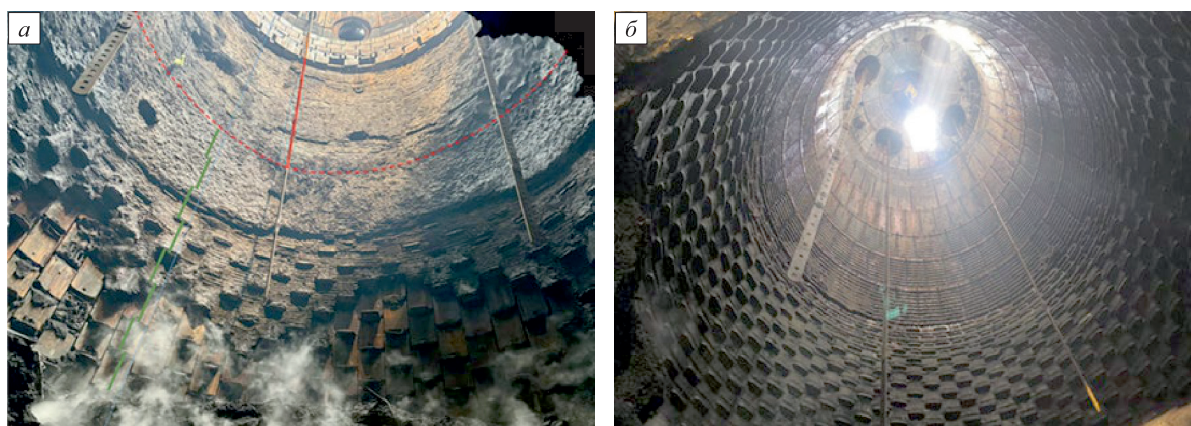


Рис. 3. Фотографии внутреннего пространства доменных печей после выдувки для капитального ремонта:
 а – ДП № 5, полезный объем 5500 м³, «классическая» шамотная футеровка шахты печи после 17,5 лет кампании;
 б – ДП № 4, полезный объем 2700 м³, высокотеплопроводная футеровка шахты печи после 19,5 лет кампании

Fig. 3. Photos of the blast furnace interior after blowout for major repairs:

а – blast furnace No. 5, useful volume of 5500 m³, “classic” fireclay lining of the furnace shaft after 17.5 years of operation;
 б – blast furnace No. 4, useful volume of 2700 m³, high-thermal conductivity lining of the furnace shaft after 19.5 years of operation

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЙ ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЦЕПОЧКИ ПРОИЗВОДСТВА ЧУГУНА НА ПРИМЕРЕ ПАО «СЕВЕРСТАЛЬ»

В настоящее время около 72 % стали в мире производится в технологической цепочке «доменная печь – конвертер»¹. Одномоментный отказ от сложившихся столетиями способов производства стали во всем мире представить сложно в силу прогнозируемых гигантских капитальных затрат и недостаточного развития в настоящее время неуглеродных способов получения первичного железа из добываемых руд.

Для крупного металлургического комплекса, производящего более 11 млн т стали в год, наиболее вероятным выглядит путь максимального повышения эффективности технологии действующих агрегатов с постепенным смещением фокуса развития на низко- или безуглеродное восстановление оксидов железа

и электроплавку по мере удешевления «зеленого» водорода и «возобновляемой» электроэнергии. Именно такой путь выбирает ПАО «Северсталь», стремясь максимально повысить эффективность первого передела в переходном периоде (рис. 4).

Выводы

На основании анализа теоретических оценок и текущих производственных результатов выплавки чугуна в условиях ПАО «Северсталь» определен потенциал сокращения расхода твердого топлива в доменной плавке.

Предложены направления корректировки состава и качественных характеристик сырья и топлива, технологических параметров и способов ведения процесса выплавки чугуна в условиях переходного периода от классической к низкоуглеродистой металлургии.

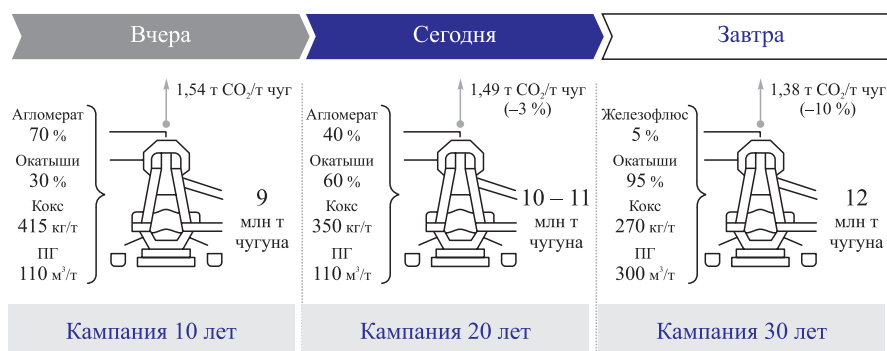


Рис. 4. Потенциал развития технологической цепочки производства чугуна на примере ПАО «Северсталь»

Fig. 4. Potential for development of technological chain of cast iron production on the example of PJSC Severstal

¹ World Steel Association. Available at URL: <https://worldsteel.org/steel-topics/sustainability/sustainability-indicators-2023-report>.

На основании выполненных исследований и установленных закономерностей разработана и принята к реализации стратегия развития первого передела ПАО «Северсталь», предусматривающая поэтапный отказ от агломерационного передела с увеличением доли окатышей в доменной шихте до 90 %, сокращением расхода кокса в доменной плавке до уровня 270 кг/т чугуна и увеличением расхода газообразного заменителя кокса (природного газа) до 300 м³/т чугуна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. The Making, Shaping and Treating of Steel. 11th ed. The AISE Steel Foundation, Pittsburgh, PA; 1999; Chapter 1:1.
2. Андронов В.Н. Экстракция черных металлов из природного и техногенного сырья. Доменный процесс. Донецк: Норд-Пресс; 2009:377.
3. Борисов А.Ф. Советы начальнику доменного цеха. Москва: Фирма «Прогресс»; 1996:256.
4. Бабарыкин Н.Н., Галатонов А.Л., Сагайдак И.И. и др. Опытная плавка с уменьшенным выходом шлака. *Сталь*. 1964;(12):1069–1079.
Babarykin N.N., Galatunov A.L., Sagaidak I.I., etc. Experimental smelting with reduced slag output. *Stal'*. 1964;(12):1069–1079. (In Russ.).
5. Копырин И.А., Борц Ю.М., Ярхо Е.Н. и др. Оптимальная основность агломерата и окатышей. Москва: Черметинформация; 1972; сер. 3(4):27.
6. Волков Ю.П., Шпарбер Л.Я., Гусаров Ф.К. Технолог-доменщик. Справочное и методическое руководство. Москва: Металлургия; 1986:263.
7. Нестеров А.С., Балмагамбетов И.Х., Гладков Н.А. и др. К вопросу об оптимизации основности агломерата и окатышей. *Сталь*. 1989;(11):4–9.
Nesterov A.S., Balmagambetov I.Kh., Gladkov N.A., etc. On the issue of optimizing the basicity of sinter and pellets. *Stal'*. 1989;(11):4–9. (In Russ.).
8. Гладков Н.А., Нестеров А.С. Процессы в слое железорудных материалов при его нагревании. *Металлы*. 1987;(3):9–11.
Gladkov N.A., Nesterov A.S. Processes in the layer of iron ore materials during heating. *Russian Metallurgy (Metally)*. 1987;(3):9–11. (In Russ.).
9. Коршиков Г.В. Энциклопедический словарь-справочник по металлургии. Липецк: Липецкое издательство Госкомпечати РФ; 1997:781.
10. Базилевич С.В., Вегман Е.Ф. Агломерация. Москва: Металлургия; 1967:368.
11. Вегман Е.Ф. Теория и технология агломерации. Москва: Металлургия; 1974:288.
12. Патент 2518880 RU. Способ загрузки доменной печи / Суханов М.Ю., Гуркин М.А., Виноградов Е.Н. и др.; заявлено 09.01.2013; опубликовано 10.06.2014. Бюллетень № 16.
13. Патент 2733610 RU. Инновационный продукт углеродсодержащий и способ его получения / Виноградов Е.Н., Карунова Е.В., Калько А.А., Гороховский В.В.; заявлено 28.10.2019; опубликовано 05.10.2020. Бюллетень № 28.
14. Рамм А.Н. Применение комбинированного дутья в доменной плавке. В сб.: *Современные проблемы металлургии*. Москва: АН СССР; 1968:61–95.
15. Рамм А.Н. Определение технических показателей доменной плавки. Методическое руководство. Ленинград: ЛПИ; 1971:111.
16. Касьян В.В. Теоретическая температура горения как параметр комбинированного дутья. *Сталь*. 1975;(8):684–687.
Kas'yan V.V. Theoretical combustion temperature as a parameter of combined blast. *Stal'*. 1975;(8):684–687. (In Russ.).
17. Борисов Ю.С. Расчет теоретической температуры горения при комбинированном дутье в доменных печах. *Сталь*. 1965;(10):884–890.
Borisov Yu.S. Calculation of theoretical combustion temperature during combined blast in blast furnaces. *Stal'*. 1965;(10):884–890. (In Russ.).
18. Потебня Ю.М., Рихтер Р.Г., Тулуевская Т.А., Цаплина Т.С. Технологические факторы, определяющие теоретическую температуру горения. *Сталь*. 1982;(10):14–17.
Potebnya Yu.M., Rikhter R.G., Tuluevskaya T.A., Tsaplina T.S. Technological factors that determine the theoretical combustion temperature. *Stal'*. 1982;(10):14–17. (In Russ.).
19. Юсфин Ю.С., Королева В.Л., Мышляев А.И. Влияние расхода кокса на теоретическую температуру горения. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1991;34(5):8–12.
Yusfin Yu.S., Koroleva V.L., Myshlyayev A.I. Effect of coke consumption on theoretical combustion temperature. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1991;34(5):8–12. (In Russ.).
20. Патент 2798507 RU. Способ ведения доменной плавки / Виноградов Е.Н., Калько А.А., Волков Е.А., Каримов М.М., Терехов А.Л., Бабоедов Е.А.; заявлено 12.10.2022; опубликовано 23.06.2023. Бюллетень № 18.
21. Калько А.А., Виноградов Е.Н., Калько О.А., Калько А.А. Разработка и внедрение технологических мероприятий по продлению кампании доменной печи № 5 ПАО «Северсталь». *Известия вузов. Черная металлургия*. 2024;67(3):260–269.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-3-260-269>
Kal'ko A.A., Vinogradov E.N., Kal'ko O.A., Kal'ko A.A. Development and implementation of technological measures to extend the campaign of blast furnace No. 5 of PJSC Severstal. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2024;67(3):260–269.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-3-260-269>
22. Калько А.А., Леонтьев Л.И., Волков Е.А. Оценка результативности применения технологических мероприятий по продлению кампании доменной печи № 5 ПАО «Северсталь» 2006 – 2024 гг. при исследовании ее рабочего пространства в период проведения капитального ремонта I разряда. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2024;67(5):520–530.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-5-520-530>
Kal'ko A.A., Leont'ev L.I., Volkov E.A. Assessment of the effectiveness of technological measures to extend the campaign of blast furnace No. 5 of PJSC Severstal (2006 – 2024) based on an examination of its working space during a first-category overhaul. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2024;67(5):520–530.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-5-520-530>

Сведения об авторах

Information about the Authors

Евгений Николаевич Виноградов, заместитель генерального директора по производству – генеральный директор дивизиона «Северсталь Российская Сталь» и ресурсных активов, ПАО «Северсталь» Череповецкий металлургический комбинат
E-mail: envinogradov@severstal.com

Леопольд Игоревич Леонтьев, академик, советник, Президиум РАН; *д.т.н., профессор*, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»; *советник генерального директора*, Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина
ORCID: 0000-0002-4343-914X
E-mail: leo@presidium.ras.ru

Андрей Александрович Калько, руководитель центра технологического развития Upstream, ПАО «Северсталь» Череповецкий металлургический комбинат
E-mail: aakalko@severstal.com

Evgenii N. Vinogradov, Deputy General Director of Production – General Director of the Severstal Russian Steel Division and Mining Assets, PJSC Severstal, Cherepovets Steel Mill
E-mail: envinogradov@severstal.com

Leopol'd I. Leont'ev, Academician, Adviser, Russian Academy of Sciences; *Dr. Sci. (Eng.), Prof.*, National University of Science and Technology "MISIS"; *Advisor to the General Director*, I.P. Bardin Central Research Institute of Ferrous Metallurgy of the Russian Academy of Sciences
ORCID: 0000-0002-4343-914X
E-mail: leo@presidium.ras.ru

Andrei A. Kal'ko, Head of Technological Development Center Upstream, PJSC Severstal, Cherepovets Steel Mill
E-mail: aakalko@severstal.com

Вклад авторов

Contribution of the Authors

Е. Н. Виноградов – анализ производственных результатов, определение проблемных зон, разработка направлений исследований, организация и выполнение лабораторных и промышленных экспериментов, разработка мероприятий по корректировке технологии и анализ их эффективности.

Л. И. Леонтьев – постановка задачи исследования, анализ результатов, формирование выводов по работе.

А. А. Калько – анализ результатов лабораторных исследований, определение проблемных зон, разработка мероприятий по корректировке технологии, анализ эффективности мероприятий по корректировке технологии.

E. N. Vinogradov – analysis of production results, identification of problem areas, development of research directions, organizing and conducting laboratory and industrial experiments, development of technology adjustment measures and analysis of their effectiveness.

L. I. Leont'ev – setting the research task, analysis of results, drawing conclusions.

A. A. Kal'ko – analysis of laboratory test results, identification of problem areas, development of technology adjustment measures and analysis of their effectiveness.

Поступила в редакцию 22.12.2025
После доработки 12.01.2026
Принята к публикации 12.01.2026

Received 22.12.2025
Revised 12.01.2026
Accepted 12.01.2026