

Государственный научный центр Федеральное государственное унитарное предприятие
«Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И. П. Бардина»



На правах рукописи

ВИНОГРАДОВ
Евгений Николаевич

**РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ
ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОКСОАГЛОДОМЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Специальность 2.6.2. Металлургия чёрных, цветных и редких металлов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 2026

Работа выполнена в Публичном акционерном обществе «Северсталь» и Государственном научном центре Федеральном государственном унитарном предприятии «Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И. П. Бардина».

Научный руководитель:

Леонтьев Леопольд Игоревич, доктор технических наук, Академик Российской Академии наук;

Официальные оппоненты:

Загайнов Сергей Александрович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Металлургия железа и сплавов» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург;

Харченко Елена Олеговна, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры металлургии и химических технологий Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»;

Ведущая организация

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»»

Защита состоится «07» октября 2026г. В 15:00 часов на заседании диссертационного совета 31.1.007.02 при Государственном научном центре ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина» по адресу: 105005, Москва, ул. Радио 23/9, стр. 2, вход со стороны ул. Бауманская 2-я.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГНЦ ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина» и на сайте <https://www.chermet.net/learning/nauka/zashchita-dissertatsiy/vinogradov/>

Автореферат разослан «_____» _____ 2026г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук



Кац Я.Л.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Технологическое развитие мирового производства черных металлов в настоящее время направлено на решение двух основных задач: сокращение издержек производства при сохранении и улучшении качества выпускаемой продукции и снижения негативного воздействия на окружающую среду. В общем виде решение первой задачи подразумевает разработку мероприятий, позволяющих сократить расход сырья и топлива на производство единицы продукции и максимально использовать в производственном цикле некондиционные фракции железорудных материалов и кокса. Решение задачи выбора оптимальных условий работы доменных печей, обеспечивающих минимальную себестоимость чугуна при заданном уровне производства и качества продукции, основано на использовании балансовых и эмпирических моделей, позволяющих прогнозировать технико-экономические показатели доменной плавки с учетом показателей качества железорудных материалов и кокса.

Рациональные пути развития технологии доменных печей, исходя из их состояния и конструктивных особенностей, для обеспечения заданного уровня производства и качества чугуна должны планироваться с учетом: перераспределения долей агломерата и окатышей в железорудной части шихты; расхода кислорода и природного газа в комбинированном дутье; перераспределения количества и состава некондиционных железосодержащих и углеродсодержащих отходов в шихте доменных печей.

Разработка и внедрение на ПАО «Северсталь» технологии замещения кокса природным газом в доменных печах на основе теоретического анализа и экспериментальных исследований, выявление ключевых необходимых и достаточных элементов успешной реализации данной технологии позволяет достигать высоких экономических показателей, обеспечивать конкурентное преимущество внутри страны и в мире и выполнять взятые на себя обязательства в области охраны окружающей среды.

Целью диссертационной работы является разработка технологических приемов и организационных мероприятий, обеспечивающих высокоэффективное использование и максимальную загрузку мощностей коксоагломерационного производства ПАО «Северсталь» в условиях высокого расхода природного газа, переменного состава угольной и железорудной части шихты и требований к экологичности производства.

Для достижения поставленной цели предполагается решить задачи:

1. Выявление устойчивых закономерностей процессов формирования шлаковых и металлоуглеродистых расплавов при оптимизации состава шихты, обеспечивающей рациональный шлаковый режим и выплавку чугуна в условиях работы доменных печей с низким выходом шлака и переменных параметров комбинированного дутья.

2. Изучение влияния повышения содержания железа в доменной шихте на процессы восстановления, плавления и капельного течения расплава агломерата и окатышей через слой кокса различной реакционной способности.

3. Исследование влияния увеличения количества вторичных ресурсов в агломерационной шихте, в том числе оборотных, на качество агломерата.

4. Разработка новых подходов к оптимизации состава угольной шихты с использованием условно коксующихся углей, обеспечивающих заданный уровень качественных характеристик твердого топлива.

5. Исследование восстановительной способности горновых газов с переменным содержанием водорода для разработки технологических приемов ведения доменной плавки с высоким расходом природного газа.

На защиту выносятся:

-теоретическое и экспериментальное обоснование зависимости процесса науглероживания чугуна от состава и количества первичного шлака в условиях использования кокса переменного качества;

-результаты исследования влияния щелочных элементов на качественные характеристики кокса при движении его по высоте доменной печи;

- способ проведения эффективной малошлаковой магнезиальной доменной плавки с содержанием MgO в конечном доменном шлаке до 14,5%;

-результаты исследований процессов десульфурации и науглероживания чугуна в зависимости от состава и количества шлака при использовании кокса различного качества в условиях малошлаковой плавки;

-результаты изучения влияния химического состава и способа окускования железорудного сырья с содержанием SiO_2 на характер формирования расплавов

- способ получения и применения углеродсодержащего продукта для коксования, получаемого с использованием в качестве исходного сырья шихты, состоящей из 60-100% углей условно пригодных для коксования;

-технологические решения по ведению доменной плавки при использовании высокой доли окатышей и комбинированного дутья с высоким (150-250 м³/т чугуна) расходом природного газа, обеспечивающие сокращение в доменном процессе расхода углерода и выбросов CO₂.

Научная новизна

- установлены пределы возможного снижения выхода конечного доменного шлака (до 180 кг шлака на тонну чугуна) для сохранения заданного содержания серы в чугуне. При основности шлака (CaO + MgO)/SiO₂ = 1,28 – 1,32 ед. сокращение выхода шлака на каждые 10 кг/т чугуна сопровождается увеличением содержания серы в чугуне на 0,003%.

- установлены пределы возможного снижения температуры выплавляемого чугуна и содержания в нем углерода при увеличении удельного расхода, вдуваемого в доменную печь природного газа в диапазоне от 110 до 220 м³/т чугуна. Снижение теоретической температуры горения, обоснованное увеличением удельного расхода вдуваемого природного газа на каждые 10 м³/т чугуна, приводит к уменьшению температуры выплавляемого чугуна на 1,0°С и сокращению содержания [C] на 0,005%.

- впервые установлены взаимосвязи состава и количества первичного шлака с показателями процесса науглероживания чугуна при проплавке в лабораторных условиях агломерата и окатышей с использованием кокса различного качества. Увеличение оксида железа в первичном шлаке на 1,0% от массы образца приводит к сокращению содержания углерода в промежуточном металлоуглеродистом расплаве в среднем на 0,075%;

- впервые разработаны теоретические основы технологии производства в действующих коксовых батареях нового твердого заменителя кокса - инновационного продукта углеродсодержащего (ИПУС), произведенного из шихты, содержащей от 60 до 100% малоценных угольных концентратов. Полученный продукт использован в составе до 100% твердого топлива доменной плавки;

- впервые установлено различие в распределении щелочных элементов в структуре куска кокса, отобранного на высоте 2/3 шахты печи: содержание калия максимально в центре куска и плавно уменьшается на поверхности в 1,35 раза, содержание натрия максимально на поверхности куска и плавно уменьшается к центру в 2,51 раза.

Теоретическая и практическая значимость работы

Разработана и опробована в производственных условиях технология ведения малошлаковой плавки с содержанием MgO в шлаке до 14,5 % при получении чугуна с пониженным содержанием серы и кремния.

2. Получена эмпирическая зависимость разупрочнения готового агломерата при низкотемпературном восстановлении (R–3,15, ISO 4696-1) от количества возврата в составе агломерационной шихты. Установлено, что превышение рационального уровня количества возврата на 2% приводит к снижению горячей прочности агломерата на 3,2%. Полученные результаты могут быть использованы для выбора и обоснования параметров управления качеством агломерата путем оптимизации расхода оборотных продуктов аглопроцесса.

3. Разработан и внедрен в производство способ загрузки доменной печи с использованием некондиционных фракций агломерата, что позволяет повысить производительность агломерационных машин на 2,0% (2017г.) и снизить расход кокса.

4. Внедрен в производство способ снижения себестоимости чугуна за счет разработанной технологии использования углей условно пригодных для коксования в новом виде твердого топлива «ИПУС» с себестоимостью, составляющей 65-70% от себестоимости металлургического кокса, и способов ведения доменной плавки с его использованием.

5. Разработан и внедрен в производство способ ведения доменной плавки с расходом природного газа в диапазоне 151 - 200 м³/т чугуна. За период 2021 - 2023 гг. удельный расход природного газа в целом по цеху производства чугуна КАДП ПАО «Северсталь» составил более 190 м³/т чугуна при расходе твёрдого топлива менее 350 кг/т чугуна, с коэффициентом замены кокса природным газом - 0,704 кг/м³. Лучшие достигнутые месячные показатели в данном периоде по расходу твёрдого топлива составили 307,8 кг/т для ДП №1, 307,4 кг/т для ДП №3 и 335,6 кг/т по цеху в целом.

6. Разработан и внедрен в производство комплекс мероприятий, связанных с повышением качества железорудных материалов и кокса, увеличением коэффициента замены кокса природным газом, позволяющий сократить выбросы углеродсодержащих газов (CO, CO₂) в доменном и сталеплавильном производстве за счет снижения содержания углерода в чугуне на 0,10 % и уменьшения расхода углерода при выплавке чугуна на 12,4 кг/т чугуна за период с 2014 по 2023гг.

Методология и методы исследования

Работа выполнена с использованием лабораторного оборудования центра технологического развития (ЦТР) Upstream ПАО «Северсталь». Исследования характеристик железорудного сырья и кокса проводились в соответствии с международными стандартами и внутренними методиками ПАО «Северсталь». Массивы данных технико-экономических показателей работы ДП №№1÷5 ПАО «Северсталь» за 2014÷2025 гг. обрабатывались методами математической статистики.

Достоверность полученных результатов исследований обеспечивается их получением на основе экспериментов, проведенных с использованием сертифицированного лабораторного оборудования ЦТР Upstream ПАО «Северсталь», практическим применением на действующих доменных печах ПАО «Северсталь», докладами на международных научно-технических конференциях и публикациями в рецензируемых журналах.

Апробация результатов

Материалы диссертации докладывались и обсуждались на II Международной научно-технической конференции «Научно-технический прогресс в черной металлургии – 2015» (Череповец, 7 – 9 октября 2015 г.), VIII Международном конгрессе доменщиков «Металлургия чугуна – вызовы XXI века» (Москва, 07-11 ноября 2016г.), Proceedings of the Iron and Steel Technology Conference, AISTech 2020, (Cleveland, United States, 31.08-3.09.2020), 5-й Международной промышленной конференции «НДТ в черной металлургии». Производство чугуна и стали. (Москва, 11-13 октября 2023г.), 7-й международной конференции «НДТ в черной металлургии: первый передел». (Москва- Череповец, 3-4 декабря 2025г.) Получена государственная премия Вологодской области по науке и технике за работу «Разработка и внедрение комплексной технологии высокоинтенсивной ресурсосберегающей доменной плавки в коксоаглодоменном переделе ЧерМК ПАО «Северсталь»» (2016 г.).

Личный вклад автора состоит в обосновании цели и задач исследования, планировании и выполнении экспериментов, обработке и анализе полученных результатов, обсуждении и формулировке основных положений научного исследования, и подготовке публикаций.

Публикации. Основное содержание диссертации изложено в 15 научных работах, в том числе 4 статьи в рецензируемых научных журналах и изданиях, определённых ВАК РФ, 8 патентов РФ.

Соответствие диссертации научной специальности. Диссертационная работа соответствует паспорту научной специальности 2.6.2 – Металлургия черных, цветных и редких металлов»

Структура и объём работы. Работа состоит из введения, пяти глав и заключения, изложена на 176 страницах машинописного текста, содержит 47 рисунков, 28 таблиц, список использованных источников включает 159 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение посвящено обоснованию актуальности темы диссертации и выполненной работы, формулировке цели и задачи исследования, определению научной новизны и практической значимости диссертационной работы.

В первой главе дается аналитический обзор состояния вопроса и проблем повышения эффективности КАДП на современном этапе. Рассмотрены и проанализированы разработки и внедрения новых ресурсосберегающих технологий доменной плавки, даны оценки эффективности их использования. Проведенный анализ отечественных и зарубежных материалов по данным проблемам позволил четко сформулировать цель и основные задачи диссертационной работы.

Вторая глава посвящена методам снижения себестоимости чугуна путем совершенствования технологии доменной плавки с низким выходом шлака и высокой долей низкремнистых офлюсованных окатышей (ГОК Костомукша) в железорудной части шихты. Данная технология обуславливает необходимость определения минимально допустимой величины “коксового окна” (прослойки кокса при практической газонепроницаемости слоев компонентов железорудной части шихты, находящихся в пластическом состоянии) как распределителя газового потока и создания структуры столба шихты в доменной печи при использовании коксовой подачи постоянной массы. Для исследования закономерностей формирования жидких фаз из окатышей переменной основности с различным содержанием SiO_2 были проведены лабораторные плавки предварительно восстановленных по ГОСТ 21707-76 образцов. Анализ результатов показал, что значения температур начала фильтрации жидких фаз через коксовую насадку (рис.1.) повышаются в зависимости от уровня офлюсования в диапазоне изменения основности CaO/SiO_2 от 0,15 до 0,80 на 12-25°C на каждый процент снижения SiO_2 в исходном образце, при этом масса высокозакисного

первичного шлакового расплава и содержание в нем монооксида железа (FeO) сокращаются. Химические составы и массы первичных шлаков из неофлюсованных или частично офлюсованных железорудных материалов отличаются сильнее, чем из железорудных материалов с высоким уровнем основности.

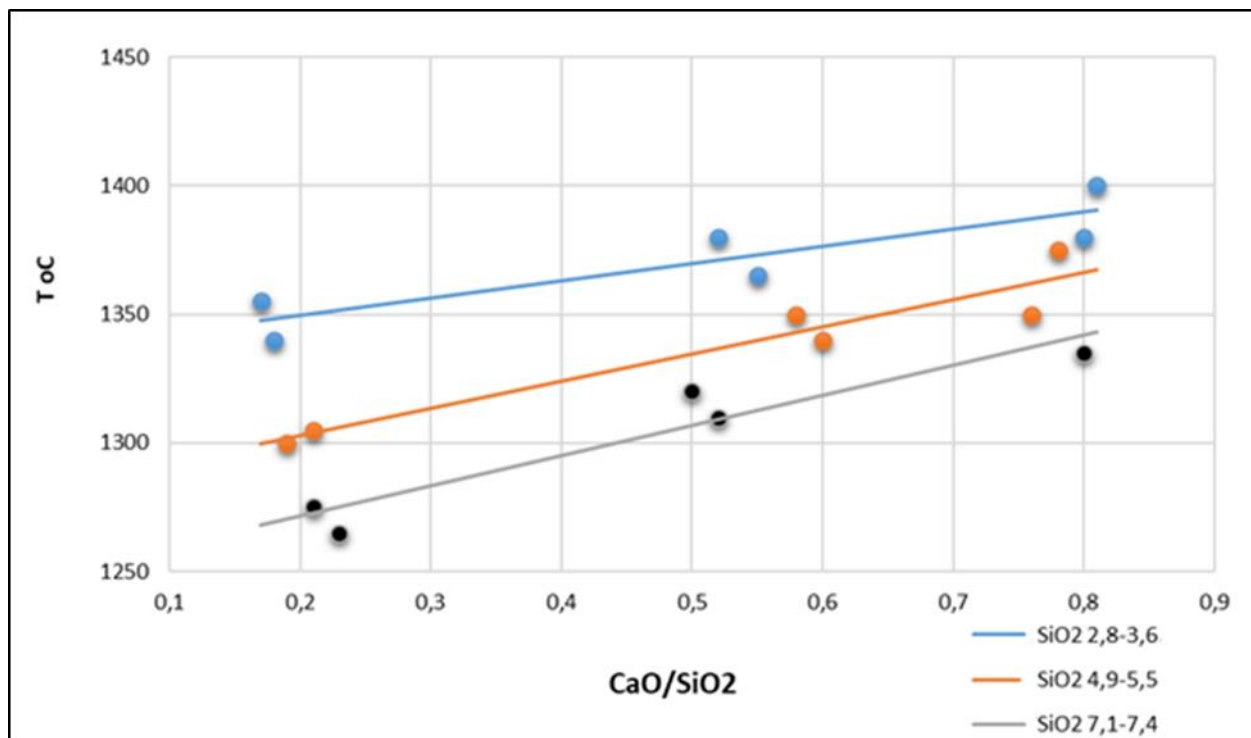


Рис.1 Изменение температур начала фильтрации жидких фаз через коксовую насадку в зависимости от основности железорудных окатышей и содержания в нем SiO2

Количество FeO в первичном шлаковом расплаве ($m\text{FeO}_{\text{пш}}, \%$), вытекшее из образца и профильтровавшееся через коксовую насадку, характеризует способность железорудных материалов к прямому восстановлению и рассчитывается как произведение доли массы первичного шлака ($M_{\text{пш}}$) от массы образца ($M_{\text{обр}}$) на процентное содержание FeO в первичном шлаке ($\text{FeO}_{\text{пш}}, \%$):

$$m\text{FeO}_{\text{пш}} (\%) = (M_{\text{пш}}/M_{\text{обр}}) \cdot \text{FeO}_{\text{пш}} (\%)$$

В результате исследований установлено, что увеличение $m\text{FeO}_{\text{пш}} (\%)$ на 1,0% приводит к сокращению содержания углерода в промежуточном металлоуглеродистом расплаве в среднем на 0,075% (рис.2). При планировании развития технологии доменной плавки с высокой долей окатышей это позволит выбрать рациональный уровень химического состава и свойств окатышей с учетом задач по снижению содержания углерода в технологии доменной плавки.

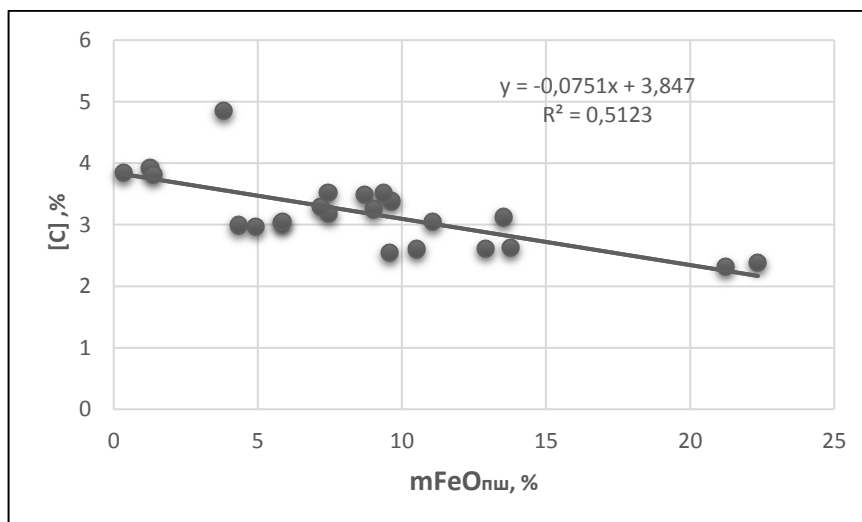


Рисунок 2 – Изменение содержания углерода [C] (%) в промежуточном металлоуглеродистом расплаве в зависимости от количества FeO в первичном шлаковом расплаве - $m \text{ FeO}_{\text{пш}}(\%)$

Освоение технологии доменной плавки с выходом шлака <250 кг/т чугуна проводилось на ДП № 5 с использованием низкокремнистых (содержание SiO_2 в диапазоне 2,8 - 3,6%), частично офлюсованных окатышей Костомукшского ГОКа с повышенным содержанием железа (до 66,0%). Результаты технико-экономических показателей доменной плавки, полученные в базовом периоде с использованием рядовых окатышей (содержание SiO_2 в диапазоне 5,0-5,5%) и среднемесячные показатели работы ДП №5 в опытном периоде с использованием низкокремнистых окатышей показало, что повышение содержания Fe (общ.) в шихте на 1,1% с уровня 59,8 до 60,9 % позволило сократить расход кокса на 1,4% и увеличить производительность доменных печей на 4,6 %.

Развитие технологии малошлаковой плавки с учетом экономической целесообразности проводилось с увеличением Ковдорского концентрата в составе аглошихты с 29% до 45%, что позволяет расширить диапазон доли применения в шихте с железорудного сырья магнезиальной пустой породой. Это привело к повышению содержания MgO в конечном доменном шлаке до 14,5%, т.е. выше значений, определенных технологической инструкцией (8,5-11,5%), что по расчетам увеличивает вязкость шлака в среднем на 10 – 15 %. Содержание железа $\text{Fe}_{\text{общ}}$ в доменной шихте при увеличении доли ковдорского концентрата увеличилось с 60,56 до 61,58 %, что привело к снижению выхода доменного шлака с 247 до 221 кг/т чугуна (табл.1).

Таблица 1– Среднемесячные показатели работы доменной печи №5 в базовом (2013г) и опытном (2014г) периодах

Показатели работы доменной печи №5	Период	
	Базовый	Опытный
Фактическое производство чугуна, т/сутки	11953	12287
Расход агломерата, кг/т чугуна	1055	1029
Расход окатышей, кг/т чугуна	498,7	491,8
Содержание $\text{Fe}_{\text{общ}}$ в шихте, %	60,6	61,9
Расход сухого доменного кокса, кг/т чугуна	423,0	414,1
Удельный расход природного газа, $\text{м}^3/\text{т}$ чугуна	96	98
Расход дутья, $\text{нм}^3/\text{мин}$	8131	8359
Выход шлака, кг/т чугуна	247	221
Основность шлака $(\text{CaO}+\text{MgO})/\text{SiO}_2$, ед.	1,30	1,32
Температура чугуна, °C	1509	1498
Поступление щелочей, кг/т чугуна	3,2	2,8
[C], %	4,88	4,88
[Si], %	0,55	0,57
[S], %	0,019	0,023

Шлаковый режим устанавливали по суммарной основности шлака $(\text{CaO}+ \text{MgO})/\text{SiO}_2$ на уровне 1,28-1,32 ед. и снижали первую основность с 1,0 до 0,95ед. Эти технологические решения позволили ДП №5 в условиях малошлаковой плавки с повышенным содержанием MgO в шлаке работать стабильно и технологически устойчиво.

Анализ продуктов малошлаковой плавки на магнезиальных шлаках для условий ДП №5 показал, что при уменьшении выхода шлака с 300 до 220 кг/т чугуна значения коэффициента распределения серы между шлаком и чугуном ($L_s = (S)/[S]$, где (S), [S] – содержание серы в шлаке и чугуне, соответственно) снижались

с 48 ед. до 24 ед., причем при работе доменных печей с выходом шлака в диапазоне 220÷ 240 кг/т чугуна Ls не превышал 32 ед. Зависимость между выходом шлака и содержанием серы в чугуне представлена на рис.3

Таким образом, в условиях малошлаковой плавки (220÷ 250 кг/т) при основности шлака $(CaO + MgO)/SiO_2 = 1,28 \div 1,32$ ед. для доменных печей ПАО «Северсталь» сокращение выхода шлака на каждые 10 кг/т чугуна сопровождалось увеличением содержания серы в чугуне на 0,003% (рис.3), что позволяет формировать заданные качественные характеристики чугуна под требования сталеплавильного передела.

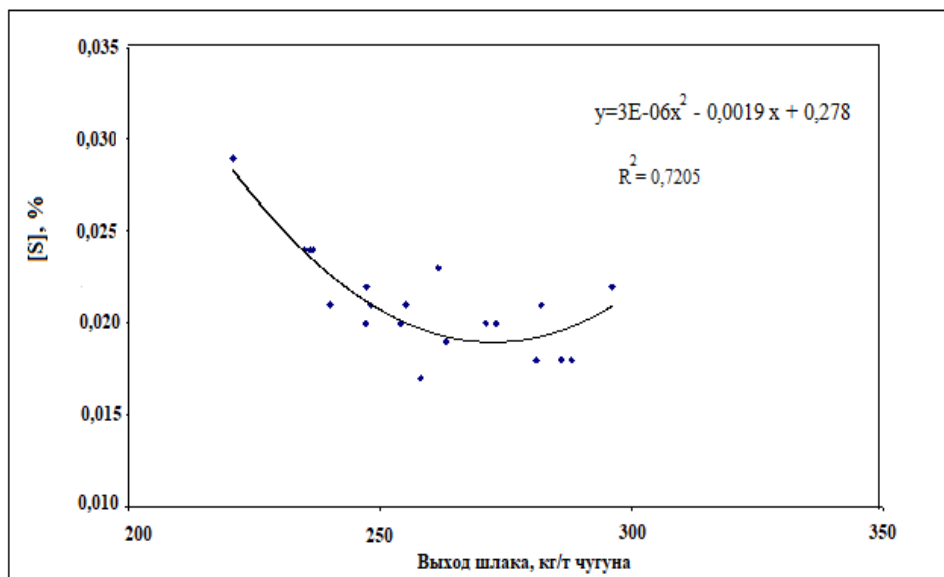


Рисунок 3 -Зависимость между выходом шлака и [S] в чугуне

Снижение содержания углерода в чугуне является одним из ресурсов увеличения экономичности доменной плавки. Для оценки взаимосвязи [C] с химическим составом и свойствами продуктов плавки был выбран недельный период работы ДП и выполнен корреляционный анализ по наиболее значимым параметрам. По полученному уравнению корреляции (1) для расчета содержания углерода в чугуне (C_p) определялось 97% расчетных значений с погрешностью в диапазоне $\pm 3\%$ (отн.) по отношению к фактическим значениям и 58,14% - в диапазоне $\pm 1\%$ (отн.). Коэффициент корреляции значений расчетного и фактического содержания углерода в чугуне составил 0,61.

$$C_p = 2,5347 + 1,4 \cdot 10^{-3} T_{\text{чуг}} - 2,2241 \cdot [S] - 2,3 \cdot 10^{-3} \cdot (TiO_2) + 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot \phi - 0,4163 \cdot TiO_2 + 0,0458 \cdot SiO_2 \quad (1)$$

где: $T_{\text{чуг}}$ – температура чугуна, °C; [S] – содержание серы в чугуне, %; (TiO_2) -содержание оксида титана в шлаке, %; ϕ – влажность дутья, г/м³; TiO_2 – содержание оксида титана в шихте, %; SiO_2 – содержание оксида кремния в шихте, %.

Полученные зависимости могут быть использованы для оперативной оценки содержания углерода в чугуне и необходимой корректировки технологических параметров с целью обеспечения заданного состава чугуна.

Третья глава посвящена повышению экономической эффективности КАДП на основе использования углей условно пригодных для коксования в составе запатентованного инновационного продукта углеродсодержащего (ИПУС). С целью разработки технологии производства ИПУС с оптимальными характеристиками были изучены химический и гранулометрический состав, физико-механические свойства, показатели реакционной способности и «горячей» прочности образцов скипового кокса и кокса, извлеченного из различных зон доменной печи, в том числе фурменной. Исследования показали, что в зависимости от качества кокса и технологических параметров плавки средний диаметр куска кокса при прохождении от поверхности засыпи до фурменного очага уменьшается в 2-2,3 раза, при этом порозность коксового слоя снижается на 25-31% (отн.). Сопоставительный анализ изменения значений CSR и CRI скипового и фурменного кокса свидетельствует о снижении «горячей» прочности фурменного кокса в среднем на 45% (отн.) и увеличении его реакционной способности на 40,0% (отн.).

Реакционную способность кокса повышает присутствие в его составе щелочей, которые снижают температурный порог начала газификации, и уменьшают его механическую прочность. По результатам контроля характеристик кокса, извлеченного с отметки 25705 мм (2/3 высоты шахты) ДП №4 и фурменного

очага, было обнаружено, что по сравнению со скиповым коксом реакционная способность повышается на 9% -54% (отн.), горячая прочность снижается на 4% - 52% (отн.), соответственно, (табл.2).

Таблица 2 – Характеристики кокса скипового, фурменного и извлеченного с отметки 25705 мм ДП №4

Наименование материала	Химический состав золы кокса, % масс.				$A^d, \%$	Реакционная способность кокса (CRI), %	Горячая прочность кокса, CSR, %
	Fe_2O_3	SiO_2	K_2O	Na_2O			
Кокс скиповый	7,27	55,2	1,17	1,31	11,9	36,1	46,0
Кокс с отметки 25705 мм	13,41	51,55	1,09	2,51	13,3	39,3	44,15
Фурменный кокс	7,56	32,05	2,59	1,85	22,7	55,7	22,0

Анализ химического состава золы извлеченного кокса (табл.2) от поверхности куска к центру (путем снятия слоев обработкой в барабане) показал, что в условиях суммарной щелочной нагрузки ($K_2O + Na_2O$) в диапазоне 2,8-3,0 кг/т чугуна содержание K_2O в золе кокса увеличивается от поверхности куска к центру с уровня 0,85% до 1,15%, т.е. в 1,35 раза. Ионы натрия в коксе в основном сосредоточены в поверхностном слое на глубине одной трети диаметра куска; содержание Na_2O в золе кокса снижается от поверхности к центру куска с 3,57% до 1,42%, т.е. в 2,51 раза (рис.4).

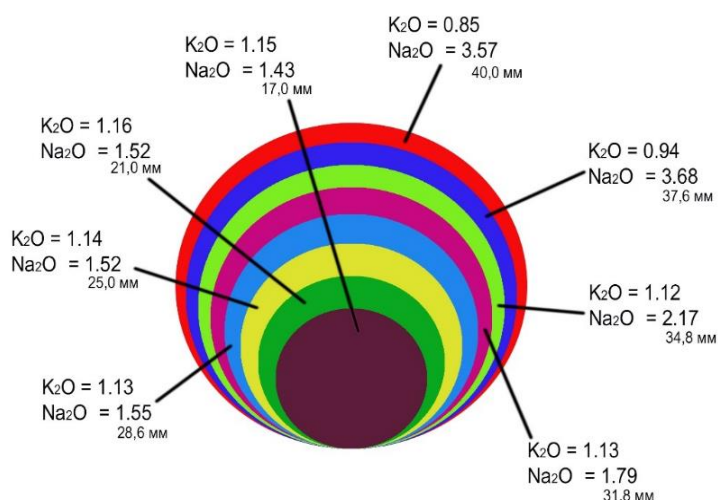


Рисунок 4 – Характер изменения содержания (% масс.) соединений калия и натрия в золе кокса по всему объему куска, отобранного с отметки 25705 мм

Таким образом, впервые показано, что прохождение кокса на уровень 2/3 высоты шахты от поверхности засыпи приводит к неравномерному распределению щелочных элементов (Na и K) в куске кокса: увеличению концентрации соединений калия в теле кокса и соединений натрия на поверхности, что повышает реакционную способность и снижает горячую

прочность кокса. Дифференцированное поведение различных щелочных элементов при проникновении в куски кокса дает возможность управления его разупрочнением за счет подбора компонентов железорудного сырья и топлива с учетом их химического состава. Уменьшению потери горячей прочности кокса способствует общее снижение щелочной нагрузки в доменной печи. В условиях выплавки чугуна с низкой щелочной нагрузкой открывается перспектива применения твердого топлива с увеличенной реакционной способностью. При этом содержание Na_2O в угольных концентратах различных отечественных поставщиков по данным входного контроля ПАО «Северсталь» за 2025г. отличается кратно и составляет величину от 0,5% до 2,4% абс. в составе золы угля, а содержание K_2O от 0,9% до 2,6% абс. соответственно. Комбинируя доли различных угольных концентратов в составе шихты для коксования, и добиваясь общего снижения содержания Na_2O , мы получаем возможность производить кокс, который по мере опускания в рабочем пространстве доменной печи будет меньше насыщаться в поверхностном слое щелочными элементами, а значит меньше терять свои исходные прочностные характеристики под воздействием комплекса физико-химических взаимодействий при выплавке чугуна. Исходные качественные характеристики такого кокса по показателям CSR и CRI могут отличаться в худшую сторону по сравнению с традиционно применяемым металлургическим коксом.

Разработка технологии малошлаковой плавки с сокращением прихода щелочей в составе пустой породы железорудной части шихты на 12,5-15,0% (с уровня 3.2 кг/т чугуна до 2.8 кг/т чугуна, т.е. на 0,4 кг/т чугуна) дает возможность включить в данную технологию использование кокса с более низким уровнем исходных

качественных характеристик, что позволяет применять ИПУС с повышенным значением CRI в условиях использования низкокремнистой шихты.

В качестве сырья для производства ИПУСа были выбраны дешевые угольные концентраты, состоящие из 60-100% малоценных углей одной или нескольких марок условно пригодных для коксования и 0-40% коксующихся углей. Углеродсодержащий продукт, полученный в процессе слоевого коксования угольной шихты, имеет фракцию не менее 25 мм и характеризуется выходом летучих веществ не более 1,0%, показателем прочности после реакции с диоксидом углерода не менее 25%. Технологический процесс проходит в коксовых батареях гравитационного типа, регламентированных температурой в контрольных вертикалях 1200-1400°C и периодом коксования от 14 до 18 часов. Экспериментально было найдено, что при длительности периода коксования менее 14 часов невозможно достичь требуемого содержания летучих веществ (менее 1%). При длительности периода коксования более 18 часов наблюдается уменьшение содержания углерода (менее 80%), что недопустимо для последующего доменного передела. Полученный углеродсодержащий продукт ИПУС по своим качественным характеристикам отвечает требованиям соответствующих стандартов оценки качества: зольность 11,5%, выход летучих веществ 0,9%, массовая доля углерода - 82,3 %, CSR -37,5, содержание фракции «+25» мм - 92%. Внедрение ИПУСа в составе топливно-восстановительных элементов для ДП №№1,2,4 ПАО «Северсталь» представлено в табл. 3.

Таблица 3 – Техничко-экономические показатели работы ДП №4 с использованием ИПУС в сентябре – ноябре 2020 г.

Наименование показателя	Период		
	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь
Производительность, т/сутки	7113	7244	6938
Расход сырья, кг/т чугуна			
Руда Яковлевская, кг/т чугуна	21,8	20,6	6,8
Агломерат, кг/т чугуна	934,8	928,2	868,3
Окатыши КостГОК, кг/т чугуна	433,8	-	-
Окатыши магнезиальные, кг /т чугуна	146,6	617,1	624,2
Содержание Fe _{общ} в шихте, %	61,04	60,81	61,04
Кокс сухой, в т.ч. кокс фракций 10-35, кг /т чугуна	402,9	42,7	42,7
Кокс фракций 10-35, кг /т чугуна	21,7	-	-
ИПУС, кг /т чугуна	5,9	358,6	370,8

Анализ эффективности разработанных предложений и рекомендаций по использованию ИПУС в доменной плавке показал, что достаточно высокий уровень характеристик холодной и горячей прочности ИПУС (M10 = 7,6%, CSR = 46,4%) позволил ввести его в качестве основного вида топлива без ухудшения технико-экономических показателей плавки.

Четвертая глава посвящена разработке и освоению технологических приемов использования некондиционных фракций железорудных материалов в агломерационном и доменном производствах.

В процессе подготовки к доменной плавке основные ЖРМ (агломерат и окатыши) подвергаются грохочению с целью отделения некондиционных фракций. Общепринятым критерием эффективности процесса грохочения является максимально возможный отсев железорудных компонентов фракции «<5мм» из соответствующих надрешетных материалов, поступающих на грохота. Отсев железорудных материалов, образующийся в результате грохочения агломерата и окатышей, 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. Рациональное количество возврата, повторно используемого в аглодоменном производстве, определяется в результате компромисса между рядом требований к шихте агломерационного и доменного производства. С одной стороны, максимальная степень удаления мелких фракций из шихтовых материалов для доменного производства связана с обеспечением газопроницаемости шихты и степени использования восстановительного потенциала газового потока, с другой стороны, приводит к увеличению количества отсеваемых фракций. Влияние возврата на удельную производительность агломашии имеет экстремальный характер и зависит от содержания крупных фракций (аглоруды, шлако-скраповой смеси) и расхода топлива. Для условий агломерационного цеха №3 (АГЦ-3) ПАО «Северсталь» удельная производительность агломашии достигает максимума при содержании возврата в аглошихте на уровне ~ 32-36%, однако работа

с максимальной производительностью часто приводит к ухудшению показателей прочности агломерата. В настоящей работе впервые исследовалось влияние содержания возврата в аглошихте на низкотемпературную прочность агломерата, которая характеризуется показателем $RDI_{3,15}$ (ISO - 4696-1) (рис. 5).

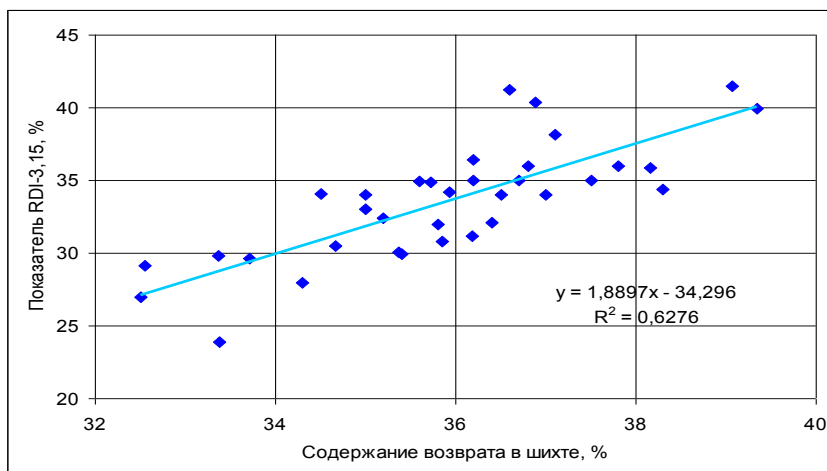


Рисунок 5 –Зависимость показателя агломерата $RDI_{3,15}$ от содержания возврата в шихте в технологических условиях АГЦ-3

Повышение содержания возврата в аглошихте на 1% обуславливает увеличение показателя $RDI_{3,15}$ на $\approx 1,9\%$, что на ДП №5 приводит к падению расхода дутья на 30 м³/мин и снижению производства чугуна более, чем на 140 т/сут. (рис. 6). Рациональным направлением решения этой проблемы является использование части отсева железорудных материалов непосредственно в доменном процессе.

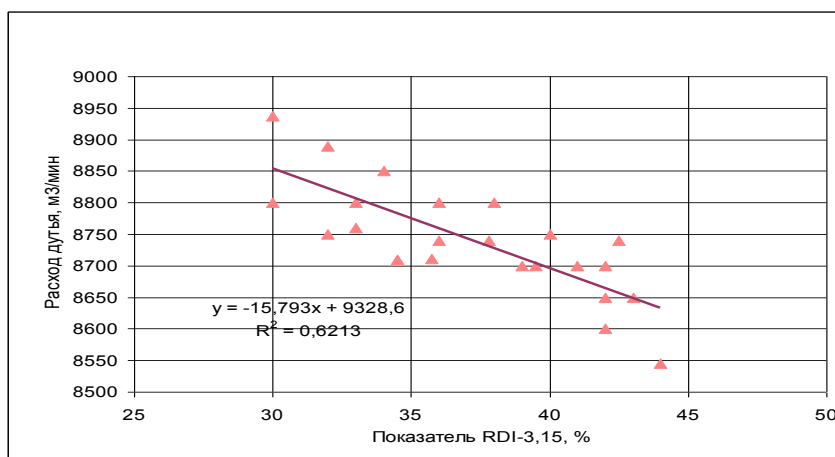


Рисунок 6 –Зависимость расхода дутья от показателя агломерата $RDI_{3,15}$ (ДП №5)

Для загрузки отсеянных фракций агломерата в составе железорудной части подач разработаны и запатентованы способы загрузки ДП, где предложено загрузку отсева агломерата фракции 0-5мм осуществлять в пристеночную зону ДП путем замены части кондиционного агломерата в голове порции на конвейере или в верхнем слое первого железорудного скипа подачи отсевом ЖРМ.

Результаты промышленных испытаний предложенного способа показали, что температура газа на периферии шахт доменных печей при применении предложенных режимов уменьшалась на 40-70°C по сравнению со штатной загрузкой. Экономия кокса и увеличение производительности печи составили 0,5 и 0,2%, соответственно. В этом периоде производительность аглофабрики по годовому продукту увеличилась на 1,2%. Разработанные способы загрузки ДП, включающие загрузку фракций отсева ЖРМ, внесены в технологическую инструкцию по выплавке чугуна на доменных печах ПАО «Северсталь».

Пятая глава посвящена разработке методов повышения эффективности работы доменных печей на комбинированном дутье с повышенным расходом ПГ, что имеет экономический аспект, основанный на эффективности замены кокса ПГ и экологический, связанный с уменьшением выбросов CO , CO_2 . Повышенный расход ПГ приводит к увеличению доли водорода в газах доменных печей, что требует существенных изменений в технологии доменной плавки. Для исследования влияния смесей газов H_2 , CO , CO_2 , на процессы восстановления, плавления и капельного течения ЖРМ различного химического состава и способа окускования была проведена серия лабораторных плавок, предварительно восстановленных агломерата и окатышей. Объектом исследований служили промышленные неофлюсованные (окатыши 1) и частично офлюсованные окатыши (окатыши 2), а также лабораторный магнезиальный агломерат. Результаты исследований влияния водорода в составе смесей восстановительных и восстановительно - окислительных газов на процессы восстановления ЖРМ представлены на рис. 7.

Полученные экспериментальные данные показывают (рис.6,7), что увеличение содержания водорода в восстановительном газе приводит к увеличению степени восстановления ЖРМ в условиях сокращения доли прямого восстановления, что, в конечном результате, дает возможность сократить расход твердого топлива на тонну чугуна. Наличие в газовой смеси CO_2 существенно снижает восстановительный потенциал водородсодержащей смеси газов в области температур начала фильтрации жидких фаз. Расчетно-аналитический прогноз показателей доменной плавки по методу А.Н. Рамма при содержании кислорода в дутье в пределах 30,0 - 35,0% и пошаговом увеличении количества ПГ в дутье от 140 м³/т до 260 м³/т чугуна для различных шихтово - технологических условий ДП объемом 1000 м³ показал, что повышение расхода ПГ на каждые 10 м³/т чугуна при постоянном уровне содержания кислорода в дутье может приводить к: снижению суточного объема производства на 0,11-0,34%; сокращению расхода кокса на 2,3-2,5%; сокращению содержания CO_2 в колошниковом газе на 0,26%. Увеличение содержания кислорода в дутье с шагом в 1,0% в пределах 30 - 35,0% по данным расчетов при одинаковом расходе ПГ должно приводить к: увеличению суточного производства на 1,05 - 1,12 %; увеличению расхода кокса на 0,45 - 0,66%; повышению содержания CO_2 в колошниковом газе на 0,33-0,40%. Расчетами показано, что коэффициент замены кокса ПГ в соответствии с тепловым балансом находится в пределах 0,91-0,93 кг/м³.

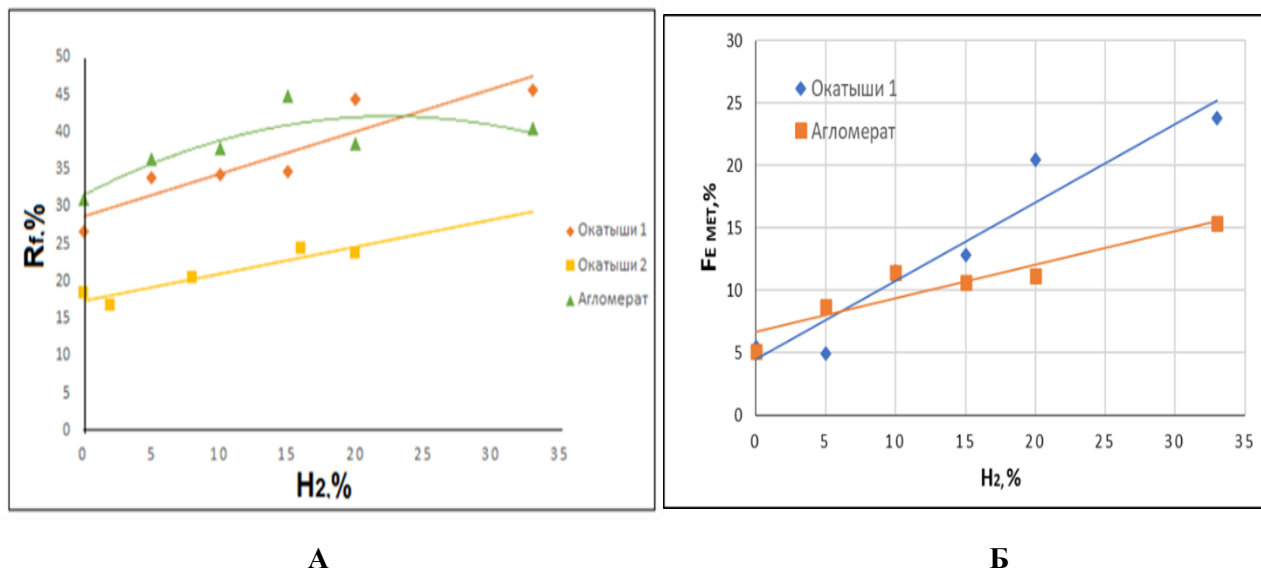


Рисунок 7. – Изменение А. степени восстановления (R_f) агломерата и окатышей (1,2), Б. количества $\text{Fe}_{\text{мет}}$ %, в агломерате и окатышах (1) в зависимости от содержания H_2 в газовой смеси $\text{H}_2 + \text{CO} + \text{N}_2$

Практическую отработку технологии выплавки чугуна в условиях высокой доли окатышей (до 90%) и повышенного расхода ПГ (>200 м³/т чугуна) проводили в 5 этапов на ДП №2 объемом 1033 м³ (табл.4). На первом этапе производственного эксперимента повышение расхода ПГ на 22 м³/т обеспечило снижение расхода твёрдого топлива на 11,5 кг/т чугуна. Вывод антрацита и снижение доли различных фракций кокса на 2,6% позволило увеличить расход дутья на 54 м³/мин. Увеличенный расход дутья с высокой долей в нём кислорода (+2,7%) обеспечил прирост производства чугуна на 287 т/сут. На втором этапе использовали в шихте 87% экспериментальных окатышей с основностью 0,9 ед., низкие прочностные характеристики которых не позволили достичь запланированных параметров плавки. На третьем этапе для минимизации негативного влияния на работу ДП низко прочных окатышей было проведено изменение состава загрузки железорудной части шихты: 40% окатышей основностью 0,9 ед., 40% окатышей основностью 0,5 ед. и 20%

агломерата. Работа на этой смеси позволила достичь расхода ПГ более 200 м³/т чугуна, что обеспечило снижение расхода твёрдого топлива на 33,3 кг/т чугуна, сокращению ТТГ до 1789⁰С, при сохранении устойчивого хода печи. Производительность ДП осталась на уровне предыдущего периода. Низкая прочность опытной партии окатышей (основность 0.9 ед.) привела к сокращению порозности столба шихты и смещению газового потока на периферию, о чем свидетельствовала высокая температура периферийных термопар и температура кладки шахты 300⁰С и 595⁰С, соответственно. Содержание водорода колошникового газа увеличилось до 14,9 %.

Таблица 4 – Показатели производственного эксперимента на ДП №2

Показатель	Этапы					
	База	1	2	3	4	5
Доля окатышей, %	38,7	39,9	81,5	78,3	75,0	40,2
Содержание Fe _{общ.} , %	60,36	60,10	63,36	62,33	63,45	60,15
Расход ПГ, м ³ /т чуг.	143,1	165,2	172,3	207,5	214,4	219,6
O ₂ в дутье, %	30,3	33,04	33,05	33,60	32,01	31,87
Производство, т/сутки	2679,6	2966,9	2812,2	2813,6	2667,4	2651,4
Твердое топливо, кг/т чугуна	408,0	396,5	396,4	374,7	367,7	359,9
Выход колош. пыли, кг/т чугуна	6,9	6,5	26,8	29,6	22,5	11,1
Дутье, м ³ /т чугуна	1762	1816	1748	1769	1719	1755
ТТГ, °С	1950	1901	1888	1789	1732	1728
Т чугуна, °С	1435,3	1434,7	1428,6	1419,8	1415,1	1410,6
Содержание [S],%	0,019	0,020	0,041	0,028	0,022	0,015
Содержание [Si],%	0,52	0,55	0,56	0,56	0,52	0,41
Т колош. газа, °С	188,6	196,0	189,5	240,9	255,6	287,8
Т периферии, °С	104,1	125,7	315,4	300,3	384,9	151,6

На четвертом этапе опытно – промышленного эксперимента рудную нагрузку постепенно повысили до значения 4,51. При переходе ДП №2 (5-й этап) на традиционную для условий ПАО «Северсталь» шихту (40% окатышей основностью 0,55 ед. и 60,0% агломерата) расход ПГ сохранили на уровне 220 м³/т чугуна, при этом расход кислорода в дутье поддерживали в пределах 32,0%, что привело к снижению ТТГ до 1730⁰С. Производительность ДП составила 2651 т/сут. (на 28 т/сут. ниже базового уровня).

Таким образом, опытно-промышленное опробование технологии доменной плавки на ДП №2 с высоким уровнем расхода окатышей (до 75-90%) и расходом ПГ (до 219,6 м³/т чугуна) показало снижение расхода твёрдого топлива на 11,8 % с коэффициентом замены кокса ПГ 0,57 кг/м³. В ходе эксперимента выявлены ограничивающие факторы, требующих дальнейшей оптимизации: повышение качества ЖРМ и твёрдого топлива, пропускной способности воздушных фурм и узлов ввода ПГ в фурменном приборе; корректировка режима загрузки для обеспечения центрального хода ДП. Данные факторы были учтены в процессе освоения технологии повышения расхода ПГ на доменных печах ПАО «Северсталь» табл.5.

Таблица 5 - Освоение технологии повышения расхода ПГ в доменных печах

Период	Этап	Основной результат
1.Июль - август 2021г.	Первые опыты на ДП №2	Отработана технология работы ДП с уровнем ТТГ менее 1800 ⁰ С и расходом ПГ более 200м ³ /т чуг.
2. Сентябрь 2021г ÷ Декабрь 2022г	Отработка технологии на ДП №№ 1, 2 с расходом ПГ >200 м ³ /т чуг.	Достигнута устойчивая работа ДП №№ 1,2 с расходом твердого топлива 330÷360 кг/т чуг. и расходом ПГ 220÷240 м ³ /т чуг.
3.Сентябрь 2022г. ÷ Март 2023г	Адаптация технологии для ДП №4 (2700м ³) и ДП №5 (5500м ³).	Устойчивая работа ДП №№ 4 и 5 с расходом твердого топлива 360 - 350 кг/т чугуна и ПГ 160÷170 м ³ /т чуг.
4.Август 2022г. ÷ Май 2023г.	Развитие технологии для ДП №3 (3200м ³).	Устойчивая работа с расходом кокса 322 – 327 кг/т чугуна и ПГ 210÷215 м ³ /т чуг.

В результате развития технологии выплавки чугуна с увеличенным расходом ПГ его удельный расход к маю 2023г. по цеху производства чугуна КАДП ПАО «Северсталь» составил более 190 м³/т чугуна при расходе твёрдого топлива менее 350 кг/т чугуна (рис.8).

Внедрение комплекса мероприятий, представленных в данной работе, позволило в среднем по доменному цеху за период с 2014 по 2023 гг. снизить содержание углерода в чугуне на 0,15 % (рис.9А) и сократить расход углерода при выплавке чугуна на 12 кг/т чугуна (рис.9Б).

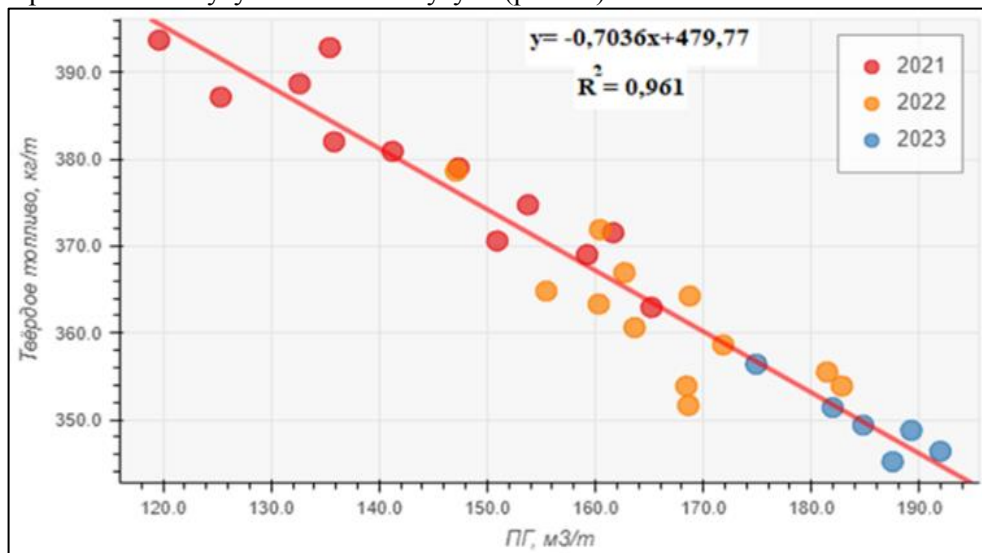


Рисунок 8. - Среднемесячные удельные расходы твёрдого топлива и ПГ при выплавке чугуна ПАО «Северсталь» за 2021-2023 гг.

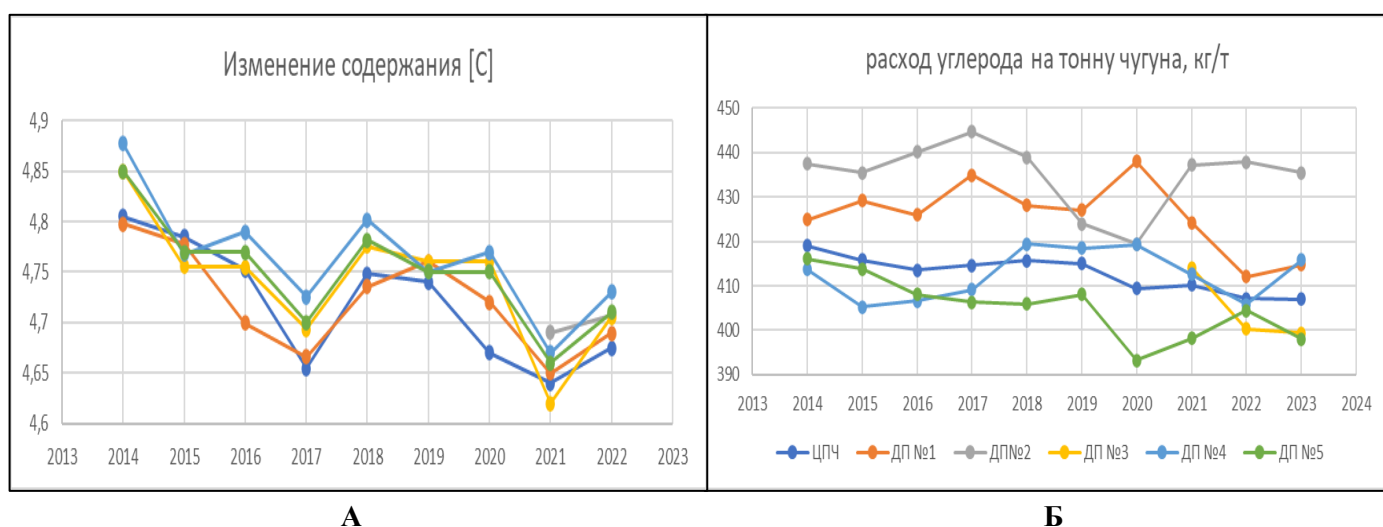


Рисунок 9. – А. изменение содержания углерода в чугуне; Б. расход углерода на тонну чугуна в доменном производстве ПАО «Северсталь» в период 2014-2023гг

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Полученные в работе результаты свидетельствуют о достижении цели диссертационной работы по разработке технологических и организационных мероприятий, обеспечивающих высокоэффективное использование и максимальную загрузку мощностей коксоаглодоменного производства ПАО «Северсталь» в условиях высокого расхода природного газа, переменного состава угольной и железорудной части шихты и требований к снижению выбросов CO₂.

Основные научные и практические результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. На основании выполненных исследований установлены пределы возможного снижения выхода шлака (до 180 кг шлака/т чугуна) для сохранения заданного содержания серы в чугуне. При основности шлака $(\text{CaO} + \text{MgO})/\text{SiO}_2 = 1,28 - 1,32$ ед. сокращение выхода шлака на каждые 10 кг/т чугуна сопровождается увеличением содержания серы в чугуне на 0,003%.
2. Экспериментально установлены взаимосвязи состава и количества первичного шлака с показателями процесса науглероживания чугуна при проплавке в лабораторных условиях агломерата и окатышей с использованием кокса различного качества. Увеличение массы оксида железа в первичном шлаковом расплаве на 1,0% от массы образца приводит к сокращению содержания углерода в промежуточном металлоуглеродистом расплаве в среднем на 0,075%.
3. Впервые установлено различие в распределении щелочных элементов в структуре куска кокса, отобранного на высоте 2/3 шахты печи в условиях суммарной щелочной нагрузки $(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ в диапазоне 2,8-3,0 кг/т чугуна: содержание калия максимально в центре куска и плавно уменьшается на поверхности в 1,35 раза, содержание натрия максимально на поверхности и плавно уменьшается к центру в 2,51 раза. Дифференцированное поведение соединений калия и натрия при интенсивном поверхностном разрушении кусков кокса с высокими значениями CRI дает возможность управления процессом разупрочнения ИПУС за счет сокращения доли компонентов железорудной части шихты с высоким уровнем содержания Na_2O .
4. Внедрен в производство способ снижения себестоимости чугуна за счет разработанной технологии использования углей условно пригодных для коксования в новом виде твердого топлива - инновационном продукте углеродсодержащем (ИПУС), произведенном из шихты, содержащей от 60 до 100% малоценных угольных концентратов, с себестоимостью, составляющей 65-70% от себестоимости металлургического кокса.
5. Разработана и опробована в производственных условиях технология ведения малошлаковой (180-250 кг шлака/т чугуна) доменной плавки с содержанием MgO в шлаке от 11,5% до 14,5 % при получении чугуна с пониженным содержанием серы и кремния, что позволяет расширить диапазон доли применения в шихте железорудного сырья с магнезиальной пустой породой.
6. Получена эмпирическая зависимость разупрочнения готового агломерата при низкотемпературном восстановлении ($R-3,15$ по ISO 4696-1) от количества возврата в составе агломерационной шихты. Установлено, что превышение рационального уровня количества возврата на 2% приводит к снижению горячей прочности агломерата на 3,2%. Полученные результаты могут быть использованы для выбора и обоснования параметров управления качеством агломерата путем оптимизации расхода оборотных продуктов аглопроцесса.
7. Разработан и внедрен в производство способ загрузки доменной печи с использованием некондиционных фракций агломерата (3-5 мм), что позволяет повысить производительность агломерационных машин за счет снижения отсева агломерата и снизить расход топлива. Максимальное фактическое использование фракции 3-5 мм агломерата для выплавки чугуна составляло 204 тыс.т /год или 22,3 кг/ чугуна в 2017г.
8. На основе лабораторных исследований установлено влияние различных составов восстановительных газов, с переменным содержанием водорода, на процесс восстановления агломерата и окатышей. Показано, что показатель восстановимости (R_f , %) увеличивается на 2,5 - 3,0% при увеличении водорода на каждые 5,0% в составе газовой смеси, что подтверждает целесообразность увеличения расхода природного газа при выплавке чугуна. Практически данные результаты были применены при освоении технологии выплавки чугуна с увеличенным расходом ПГ в диапазоне 140 - 250 м³/т и повышением доли окатышей в составе железорудной части шихты с уровня 32% до 60%.
9. Разработан и внедрен в производство способ ведения доменной плавки с расходом природного газа в диапазоне 151 - 200 м³/т чугуна. За период 2021 - 2023 гг. удельный расход природного газа в целом по цеху производства чугуна коксоаглодоменного производства ПАО «Северсталь» составил более 190 м³/т чугуна при расходе твёрдого топлива менее 350 кг/т чугуна, с коэффициентом замены кокса природным газом 0,704 кг/м³. Лучшие достигнутые месячные показатели в данном периоде по расходу твёрдого топлива составили: 307,8 кг/т для ДП №1, 307,4 кг/т для ДП №3 и 335,6 кг/т по цеху в целом.
10. Впервые установлены пределы возможного снижения температуры выплавляемого чугуна и содержания в нем углерода при увеличении удельного расхода вдуваемого в доменную печь природного газа в диапазоне от 110 до 220 м³/т чугуна. Снижение теоретической температуры горения, обоснованное увеличением удельного расхода вдуваемого природного газа на каждые 10 м³/т чугуна, приводит к уменьшению температуры выплавляемого чугуна на 1,0°C и сокращению содержания [C] на 0,005%.

11. Разработан и внедрен в производство комплекс мероприятий, связанных с повышением качества железорудных материалов и кокса, увеличением коэффициента замены кокса природным газом, позволяющий сократить выбросы углеродсодержащих газов (CO, CO₂) в доменном и сталеплавильном производстве за счет снижения содержания углерода в чугуна на 0,10 % и уменьшения расхода углерода при выплавке чугуна на 12,4 кг/т чугуна за период с 2014 по 2023гг.
12. 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.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- а) Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определённых ВАК РФ:
1. Разработка и внедрение технологии замещения кокса природным газом для снижения расхода твердого топлива на классических доменных печах ПАО «Северсталь» /Е.Н. Виноградов и др. // Металлург. – 2024. - №1. – С. 11-16.
Vinogradov E.N., Kal'ko A.A., Chikinov S.V., Volkov E.A., Kal'ko O. A. Development and implementation of technology for replacing coke with natural gas to reduce solid fuel consumption in classic blast furnaces of the severstal company // Metallurgist, 2024, 68(1), pp. 1–9.
 2. Калько А.А., Виноградов Е.Н., Волков Е.А. и др. Опыт проведения предпусковых исследований на доменных печах ПАО «Северсталь» во время капитальных ремонтов I разряда // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2025. Т. 81. № 12. - С.14-24. DOI: 10.32339/0135-5910-2025-12-14-24
 3. Виноградов Е.Н, Калько А.А, Волков Е.А. Определение фактического коэффициента замены кокса природным газом при выплавке чугуна в доменных печах. Практический опыт ПАО «Северсталь» // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2025. Т. 81. № 12. - С.5-13. DOI: 10.32339/0135-5910-2025-12-5-13
 4. 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. DOI:10.17073/0368-0797-2026-1-6-13
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), pp. 6–13.
- б) патенты
5. Патент № 2518880 РФ. Способ загрузки доменной печи: № 2013100318 :заявл.09.01.2013: опубл. 10.06.2014. Бюл. №16/ Суханов М.Ю., Гуркин М.А., Каримов М.М., Виноградов Е.Н. и др. – 7с.
 6. Патент №2 621206 РФ. Способ малошлаковой доменной плавки на магнезиальных шлаках: №2015150801: заявл. 2015.11.26: опубл. 01.06.2017. Бюл. № 16/ Виноградов Е.Н. и др. – 6 с.
 7. Патент № 2 608524 С1 РФ. Способ формирования шихты для получения металлургического кокса с заданным показателем горячей прочности CSR: №2015150495: заявл. 24.11.2015: опубл. 19.01.2017. Бюл.№2 / Виноградов Е.Н. и др. – 10 с.
 8. Патент 2 673898 РФ. Способ загрузки доменной печи: №2017139370: заявл. 13.11.2017, опубл. 03.12.2018 /Суханов М.Ю., Гуркин М.А., Виноградов Е. Н. и др. – 7 с.
 9. Патент №2733610 РФ. Инновационный продукт углерод содержащий и способ его получения: №2019134518: заявл. 28.10.2019.: опубл. 05.10.2020. Бюл. № 28/ Виноградов Е.Н., Карунова Е.В., Калько А.А., Гороховский В.В. – 6с.
 10. Патент 2745787 С1 РФ. Способ получения кокса для доменного производства: № 2020120374: заявл. 15.06.2020: опубл. 31.03.2021. Бюл. №10 / Виноградов Е.Н. и др. - 6с.
 11. Патент № 2813432 РФ. Способ выплавки чугуна: №2023130327; заявл. 22.11.2023; опубл. 12.02.2024. Бюл. № 5/ Виноградов Е.Н. и др.-13с.
 12. Патент № 2814184 РФ. Способ получения металлургического кокса: № 2023117825; заявл. 06.07.2023; опубл. 26.02.2024. Бюл. № 6/ Виноградов Е.Н., Калько А.А., Карунова Е.В. – 6с.
- в) другие публикации
13. О потерях дутья в доменном производстве / А.В. Лычев, Е. Н. Виноградов, И.В. Логинов // Черные металлы. – 2010. –№4. – С. 8-13.

14. Снижение тепловых потерь через воздушную фурму доменной печи / Е.Н. Виноградов, А.Г. Радюк, Е.А. Волков, А.Л. Теремов, Т.Ю. Сидорова //Сталь. – 2019. – № 11. – С. 9-12.
15. Исследование влияния печных газов, щелочных элементов и первичных шлаков на реакционную способность кокса/ Е.Н. Виноградов и др.// Научно-техн. прогресс в черной металлургии – 2017: III Междунар. науч. конф., Череповец: ЧГУ, 2017. – С.50-56.