

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке и инновациям

НИТУ МИСИС

д.т.н., проф.

М.Р. Филонов

«8» сентября 2026 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Виноградова Евгения Николаевича

«Разработка и внедрение ресурсосберегающих технологий повышения
эффективности коксоаглодоменного производства»,

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по
специальности 2.6.2-Металлургия чёрных, цветных и редких металлов.

Актуальность работы

Технологическое развитие мирового производства черных металлов в настоящее время направлено на решение таких основных задач, как сокращение издержек производства при сохранении и улучшении качества выпускаемой продукции, снижение негативного воздействия на окружающую среду. Решение этих задач подразумевает поиск резервов, позволяющих сократить расход сырья и топлива, снизить себестоимость производства единицы продукции за счет освоения технологии доменной плавки с низким выходом шлака, максимального использования в производственном цикле некондиционных фракций железорудных материалов (ЖРМ) и кокса, рационального перераспределения долей агломерата и окатышей в железорудной части шихты, увеличения расхода и повышения эффективности использования восстановительных газов. Переход на низкоуглеродистое ведение доменной плавки, предопределяет успешное развитие металлургической компании по вышеуказанным направлениям и позволяет не только достигать высоких экономических показателей, обеспечивать конкурентное преимущество внутри страны и в мире, но и обеспечить выполнение взятых на себя обязательств в области охраны окружающей среды.

Целью работы явилась разработка научных основ и технологических приемов, обеспечивающих высокоэффективное использование и максимальную загрузку мощностей коксоаглодоменного производства (КАДП) ПАО «Северсталь» в условиях расхода природного газа более 150 м³/т чугуна, переменного состава угольной и железорудной части шихты и требований к экологичности производства.

Достижение данной цели потребовало решения следующих задач:

- 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;
- изучение влияния повышения содержания железа в доменной шихте на процессы восстановления, плавления и капельного течения первичного шлакового расплава через слой кокса различной реакционной способности;
- исследование влияния изменения количества вторичных ресурсов в агломерационной шихте, в том числе оборотных, на качество агломерата;
- разработка новых подходов к оптимизации состава угольной шихты с использованием условно коксующихся углей, обеспечивающих заданный уровень качественных характеристик твердого топлива;
- исследование восстановительной способности горновых газов с переменным содержанием водорода для разработки технологических приемов ведения доменной плавки с высоким расходом природного газа (ПГ).

Поставленные для достижения данной цели задачи соискатель решает последовательно и грамотно. Он теоретически и экспериментально обосновывает технологию ведения малошлаковой доменной плавки при повышении содержания магнезии в шлаках, с увеличением расхода природного газа и снижением расхода твердого топлива, использование металлургического кокса в производстве которого используются угли условно пригодные для коксования, решает вопросы по комплексу мероприятий, связанных с повышением качества ЖРМ и кокса, увеличением коэффициента замены кокса ПГ, позволяющий сократить выбросы углеродсодержащих газов (CO , CO_2) в доменном и сталеплавильном производстве.

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

Основное содержание диссертации, ее основных выводов и результатов.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и выводов, списка использованных источников. Работа изложена на 176 страницах, включая 46 рисунков, 27 таблиц.

По результатам рассмотрения предоставленной диссертации, автореферата, а также

основных публикаций по теме диссертационного исследования определено следующее.

Во введении приведена актуальность темы диссертации и выполненной работы, его научная новизна и практическая значимость, даны необходимые определения. Сформулирована цель работы и способ ее достижения.

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..

Во второй главе выполнен анализ снижения себестоимости чугуна путем совершенствования технологии доменной плавки с низким выходом шлака и высокой долей низкокремнистых 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. Исследование железорудной части доменной шихты с различным соотношением агломерата и окатышей, увеличением доли Ковдорского концентрата в агломерационной шихте, поведение высокотемпературной обработки материалов разной основности $(\text{CaO}+\text{MgO})/\text{SiO}_2$ в доменной печи, образования и фильтрации первичных шлаков позволяет предопределить основные вариации малошлаковой доменной плавки, в том числе и увеличения экономичности доменной плавки и позволяет формировать заданные характеристики чугуна под требования сталеплавильного передела.

В заключительной части главы приводится зависимости взаимосвязей содержания углерода в чугуне с характеристиками шихты и продуктов плавки, а также с параметрами процесса плавки по показаниям различных систем контроля в промышленных условиях, что в реальных условиях доменного цеха обеспечивает более высокую точность оперативного прогнозирования содержания углерода в чугуне, включает следующие параметры: температуру чугуна, содержание серы в чугуне, содержание оксида титана в шлаке, влажность дутья, содержание оксида титана в шихте и содержание оксида кремния в шихте.

В третьей главе рассматриваются варианты снижения себестоимости чугуна за счет использования инновационного твердого топлива на основе угля условно пригодных

для коксования. При разработке технологии производства данного топлива исследованы зависимости технологических параметров плавки от качественных характеристик кокса, включая трансформацию его свойств по ходу перемещения от верха печи к фурменной зоне, в том числе определить влияние щелочей на изменение характеристик кокса в рабочем пространстве доменных печей. Полученные результаты исследования дают основание предположить, что более быстрым процессом является разукрупнение в результате реакции газификации кусков кокса с малой реакционной способностью, что свидетельствует о возможности более полного использования кокса с повышенной реакционной способностью. В условиях ПАО «Северсталь» они служат основанием для возможности увеличения использования в шихте для коксования доли дешевых углей с повышенным содержанием летучих, имеющих высокую реакционную способность, особенно при реализации шагов по уменьшению щелочной нагрузки в доменной печи в условиях перехода технологии на выплавку чугуна с низким выходом шлака (приведенные в разделе 2).

В четвертой главе представлены результаты исследования при разработке и освоению технологических приёмов использования некондиционных фракций 0-6 мм железорудных материалов в агломерационном и доменном производствах. В результате исследований определено влияние количества возврата агломерата на показатель прочности агломерата после восстановления, что напрямую влияет на использование тепловой и восстановительной способности доменного газа. В результате проведенной работы разработаны технологические приемы, предусматривающие использование отсеваемых фракций железорудных материалов, которые имеют ряд технологических ограничений: загрузка отсеваемых фракций железорудных материалов «0 – 6 мм» в составе доменной шихты применяется периодически в зависимости от устойчивости хода доменной печи, состояния футеровки шахты, горна и лещади, а также наличия подготовленных к загрузке отсеваемых железорудных материалов. Дополнительно использование некондиционных фракций агломерата служит цели снижения себестоимости чугуна, экономии кокса, увеличению производительности ДП, увеличению производительности аглофабрики по годному агломерату.

Пятая глава посвящена разработке методов повышения эффективности работы доменных печей на комбинированном дутье с повышенным расходом ПГ, включая исследование влияния водорода в составе смесей восстановительных и восстановительно - окислительных газов на процессы «восстановления - плавления» железорудных материалов. В результате проведенных работ сделан вывод, что увеличение содержания водорода в восстановительном газе приводит к увеличению степени восстановления

агломерата и окатышей в условиях сокращения доли прямого восстановления, что, в конечном результате, дает возможность уменьшить необходимое количество твердого топлива за счет увеличения степени использования ПГ, при этом наличие в газовой смеси CO_2 существенно снижает восстановительный потенциал водородсодержащей смеси газов в области температур начала фильтрации жидких фаз. Далее было проведено опытно-промышленное освоение технологии работы доменной печи с высоким уровнем расхода окатышей (до 90 %) и природного газа (до 200 м³/т чугуна), которое подтвердило теоретические предпосылки работы доменных печей с высоким расходом ПГ и увеличением доли окатышей. Также в рамках работы 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 и определены ограничения для данной технологии, в основном связанные с комплексом мероприятий направленных на повышение качества железорудных материалов и кокса.

В заключении представлены основные выводы и результаты диссертационного исследования, которые полностью отражают полученные результаты и подчеркивают их значимость.

Работа оформлена в соответствии с требованиями, предъявляемыми к кандидатским диссертациям. Автореферат полностью отражает основные положения диссертационной работы, содержание которой соответствует паспорту специальности 2.6.2 Metallurgia черных, цветных и редких металлов.

Основные научные результаты работы изложены в 15 публикациях, в том числе в 7 статьях в российских научных изданиях, входящих в перечень ВАК Минобрнауки РФ, получено 8 патентов на разработанную технологию ведения доменной плавки.

Теоретическая и практическая значимость полученных результатов обусловлена тем, что разработанные технологические и организационные мероприятия по коксоаглодоменному переделу на металлургическом комбинате обеспечивают экономически обоснованное ведение доменной плавки с снижением воздействия на окружающую среду.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

1. 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 $(\text{CaO} + \text{MgO})/\text{SiO}_2 = 1,28 - 1,32$ ед. сокращение выхода шлака на каждые 10 кг/т чугуна сопровождается увеличением содержания серы в чугуне

на 0,003%.

2. 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%.

3. Впервые практически 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%.

4. 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.

5. 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.

Практическая значимость.

1. 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.

Достоверность основных выводов и положений по диссертации подтверждается применением корректных методов и методик испытаний и использованием современного оборудования для изучения экспериментальной технологии и продуктов опытных плавок и применением современных математических методов компьютерного моделирования.

Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов. Полученные в ходе выполнения исследования результаты показали, что разработанные технологические и организационные мероприятия позволяет оценить пути перехода к малоуглеродной доменной плавке, увеличение использования вторичных материалов с экономически целесообразным управлением свойствами коксовой, агломерационной и доменной шихтой. Таким образом, представленная работа может быть интересна инженерному составу организаций, производящих передельный чугун (ПАО Магнитогорский металлургический комбинат, ПАО «Евраз», ПАО «Челябинский металлургический комбинат», ПАО «НЛМК» и т.д.).

Замечания по диссертационной работе

1. В главе 5.4 при описании освоения технологии с повышенной долей окатышей не представлены сравнительные характеристики базовых и экспериментальных окатышей, что затрудняет оценку влияния качественных показателей окатышей на изменение железорудной части доменной шихты и ход доменной плавки.
2. Можно признать спорным вывод о том, что малошлаковая плавка с повышенной долей MgO в конечном шлаке в отечественной практике отработана впервые, но для условий ПАО «Северсталь» это утверждение, безусловно, справедливо, предложенные решения отражают экономически и экологически обоснованное развитие данной технологии в масштабах РФ.
3. Общий вид рисунков 2.11, 2.12, а именно наложение расчетных и экспериментальных значений содержания углерода, затрудняет интерпретацию представленных результатов.
4. В тексте диссертационной работы содержится ряд опечаток.

Указанные недостатки не являются принципиальными и не снижают общего положительного впечатления от диссертации и ее научной и технической значимости, работа заслуживает высокой оценки.

Заключение

Диссертационное исследование представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой изложены новые научно обоснованные решения и предложены новые подходы к технологическим и организационным мероприятиям в коксоаглодоменном производстве металлургического завода полного цикла.

Диссертационная работа Виноградова Евгения Николаевича на тему: «Разработка и внедрение ресурсосберегающих технологий повышения эффективности коксоаглодоменного производства» по актуальности тематики, объему полученного экспериментального материала, его новизне, научной и практической значимости соответствует критериям п. 9-14 Постановления Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 «О порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Виноградов Евгений Николаевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.2 – Металлургия черных, цветных и редких металлов.

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании кафедры функциональных наносистем и высокотемпературных материалов НИТУ МИСИС «08» сентября 2026 года. (Протокол № 2 от «08» сентября 2026 года)

Заведующий кафедрой функциональных
наносистем и высокотемпературных материалов
НИТУ МИСИС
к.т.н., доцент



Д.В. Кузнецов

Адрес: 119049, г. Москва, Ленинский проспект, д.4, стр. 1

Тел.: +7 (495) 236-84-18. E-mail: dk@misis.ru

Подпись заведующего кафедрой функциональных
наносистем и высокотемпературных материалов
НИТУ МИСИС к.т.н., доцента Д.В. Кузнецова



КУЗНЕЦОВА А.Е.

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

Адрес: 119049, г. Москва, Ленинский проспект, д.4, стр. 1 Тел.: +7 (495) 236-84-18.

E-mail: dk@misis.ru веб-сайт: <https://misis.ru>