

Публичное акционерное общество «Северсталь»
Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный
научно-исследовательский институт чёрной металлургии им. И. П. Бардина»

На правах рукописи



ВИНОГРАДОВ
Евгений Николаевич

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

2.6.2 Металлургия черных, цветных и редких металлов

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук,
академик РАН
Леонтьев Леопольд Игоревич

Череповец - 2026

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ КОКСОАГЛОДОМЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА ПАО «СЕВЕРСТАЛЬ» И МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЕГО РАБОТЫ	11
1.1 Сравнительный анализ основных характеристик и состояния коксоаглодоменного производства ПАО «Северсталь»	11
1.2 Металлургические свойства железорудных материалов с повышенным содержанием железа	14
1.3 Влияние повышенной доли окатышей в шихте на результаты работы доменных печей	17
1.4 Особенности работы группы доменных печей	26
1.5 Работа доменных печей с низким выходом шлака	28
1.5.1. Химический состав и основные свойства доменных шлаков	28
1.5.2 Влияние содержания магнезии на свойства и характеристики доменного шлака	34
1.6 Анализ опыта применения природного газа и водорода в металлургии, перспективы развития и экологические аспекты	37
Выводы по разделу 1	43
2. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ С НИЗКИМ ВЫХОДОМ ШЛАКА И ВЫСОКОЙ ДОЛЕЙ ОКАТЫШЕЙ В ЖЕЛЕЗОРУДНОЙ ЧАСТИ ШИХТЫ	45
2.1 Исследование закономерностей формирования расплава при использовании железорудной шихты с низким содержанием SiO_2	45
2.2 Освоение технологии доменной плавки с низким выходом шлака в условиях увеличения содержания MgO на коксах различного качества	50
2.3 Изменение показателей качества чугуна в условиях малошлаковой плавки	59
2.4 Исследование влияния технологических параметров плавки на содержание углерода в чугуне	63
Выводы по разделу 2	73
3. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕТРАДИЦИОННЫХ ВИДОВ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА	76
3.1. Экспериментальные исследования свойств фурменного кокса	76
3.2. Исследование влияния щелочных элементов на изменение характеристик кокса в рабочем пространстве доменной печи	86
3.3. Разработка технологии производства инновационного углеродсодержащего продукта (ИПУС) с использованием до 100% условно коксуемых углей в шихте для коксования	92
3.4 Разработка дополнений к технологической инструкции по выплавке чугуна с использованием ИПУС	96
Выводы по разделу 3	100

4 РАЗРАБОТКА И ОСВОЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРИЕМОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕКОНДИЦИОННЫХ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ МАТЕРИАЛОВ	102
4.1 Исследование влияния использования возврата агломерата на состав и свойства готового продукта аглопроцесса	102
4.2 Совершенствование технологических требований к распределению агломерата и окатышей по сечению доменной печи и способов загрузки отсеваемых фракций железорудных компонентов шихты	107
4.2.1 Разработка технологических ограничений по количеству отсева железорудных материалов, загружаемого в доменную печь	107
4.2.2 Разработка способа загрузки отсеянных фракций агломерата и окатышей	110
Выводы по разделу 4	115
5. РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ НА КОМБИНИРОВАННОМ ДУТЬЕ С ПОВЫШЕННЫМ РАСХОДОМ ПРИРОДНОГО ГАЗА.	117
5.1 Критерии оценки эффективности замены кокса природным газом	117
5.2 Исследование влияния водорода в составе смесей восстановительных и восстановительно – окислительных газов на процессы «восстановления – плавления» железорудных материалов.	120
5.3 Расчетно – аналитический прогноз технико – экономических показателей работы доменной печи в условиях увеличения количества природного газа в дутье (до 260 м ³ /т чугуна) и повышения кислорода в дутье (до 35,0%)	131
5.4 Опытнo-промышленное освоение технологии работы с высоким уровнем расхода окатышей и природного газа на ДП №2 (июнь-август 2021г.)	136
5.5 Отработка технологии повышения расхода природного газа на доменных печах различного объема	143
Выводы по разделу 5	152
ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ	155
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	159
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	160
ПРИЛОЖЕНИЕ	177

ВВЕДЕНИЕ

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.

Объект исследования – коксоаглодоменное производство, агломерат и окатыши, кокс, твердые и газообразные углеродсодержащие заменители, чугун и шлак.

Предмет исследования – оптимизация состава шихтовых материалов, технология доменной плавки с высокой долей окатышей, низким выходом шлака и высоким расходом природного газа.

Целью диссертационной работы является разработка технологических приемов 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 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.

Научная новизна:

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.

Теоретическая и практическая значимость работы:

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 , CO_2) в доменном и сталеплавильном производстве за счет снижения содержания углерода в чугунах на 0,10 % и уменьшения расхода углерода при выплавке чугуна на 12,4 кг/т чугуна за период с 2014 по 2023 гг.

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

Положения, выносимые на защиту:

- 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 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 низким 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 ($150\text{--}250 \text{ м}^3/\text{т}$ чугуна) расходом природного газа, обеспечивающие сокращение в доменном процессе расхода углерода и выбросов CO_2 .

Апробация работы. 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 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 – Metallургия черных, цветных и редких металлов.

Объем и структура диссертации.

Диссертационная 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.

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ КОКСОАГЛОДОМЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА ПАО «СЕВЕРСТАЛЬ» И МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЕГО РАБОТЫ

1.1 Сравнительный анализ основных характеристик и состояния коксоаглодоменного производства ПАО «Северсталь»

В настоящее время коксоаглодоменное производство ПАО «Северсталь» (КАДП ПАО «Северсталь») представляет собой предприятие мирового уровня, которое производит более 11 млн. т передельного чугуна в год на пяти доменных печах, имеет 8 действующих коксовых батарей с общим производством кокса 5 млн. тонн, 8 агломерационных машин с годовым производством более 10 млн.т/год агломерата. Удельная выплавка чугуна достигает 2,53 т/м³, расход скипового кокса – 346,4 кг/т чугуна [1,2,3,4].

Достигнутые показатели являются результатом многолетнего совершенствования технологии доменной плавки с учетом обоснованного выбора рациональных характеристик и состава сырья, параметров дутьевого и шлакового режимов, режима загрузки, параметров тепловой работы доменных печей и выпуска продуктов плавки. Поскольку одними из основных требований к работе доменных печей является экономичность и возможность оперативного изменения уровня производства и состава выплавляемого чугуна с минимальными потерями при работе в переходных режимах, особое внимание уделяется разработке и освоению технологических приемов, обеспечивающих повышение устойчивости хода доменной плавки на основе рационального распределения шихтовых материалов по сечению и высоте печи в условиях нестабильности шихтовых условий и увеличения количества используемых вторичных и некондиционных шихтовых материалов.

КАДП ПАО «Северсталь» было образовано в 2014 году в результате слияния трех производств: коксохимического, агломерационного и доменного и включает в себя два фактически отдельных комплекса по производству чугуна, которые принципиально отличаются характеристиками агломерационных машин, объемом

доменных печей и особенностями их футеровки, свойствами агломерата и качеством кокса [2]:

Комплекс 1: Коксовый цех №1, агломерационный цех №2 и блок доменных печей №№1, 2, 3, 4.

Комплекс 2: Коксовый цех №2, агломерационный цех №3 и крупнейшая в Европе доменная печь №5.

С 2020 г. в составе КАДП так же функционирует Коксовый цех №3, имеющий в своем составе коксовую батарею №11 с технологией трамбования угольной шихты мощностью 1400 тыс. т кокса/год, который может использоваться во всех доменных печах ПАО «Северсталь».

Основные особенности технологической цепочки Комплекса 1: использование кокса различного качества, работа агломерационного цеха в ограниченных условиях по возможности раздельного дозирования видов железорудного сырья, различная конструкция доменных печей. Доменные печи №1 и №2 имеют устаревшую конструкцию с футеровкой шахты, выполненной из шамотных огнеупоров, а также двухконусные загрузочные устройства (КЗУ). Доменные печи №3 и №4 имеют современную конструкцию высокоэффективной системы охлаждения и высокотехнологичное бесконусное загрузочное устройство (БЗУ), но их интеграция в технологическую цепочку блока малых печей не позволяет в полной мере использовать потенциал, заложенный при проектировании.

Для второй технологической цепочки характерны использование только кокса сухого тушения при отсутствии дефицита кокса собственного производства, ограничения по возможности раздельного дозирования 3-х видов железорудных концентратов и техногенных видов сырья в агломерационном цехе. Футеровка шахты ДП№5, выполненная из шамотных огнеупоров, и относительно низкоэффективная система охлаждения печи вносят значительные ограничения по использованию окатышей и техногенных видов сырья в составе доменной шихты. Наличие БЗУ и конвейерная система подачи шихтовых материалов на колошник обеспечивают потенциал управляемого распределения отдельных видов шихтовых

материалов по поверхности засыпи и позволяют подбирать высокоэффективные режимы загрузки с частичной компенсацией ограничений по составу сырья.

В начале второго десятилетия XXI века рост уровня развития технологии коксоаглодоменного передела ПАО «Северсталь» сдерживался следующими факторами:

1. Наличие в составе комбината двух фактически отдельных технологических цепочек по производству чугуна, принципиально отличающихся качеством кокса, характеристиками агломерационных машин и свойствами агломерата, объемом доменных печей и их конструктивными особенностями.

2. Неудовлетворительное качество сырья:

- качество агломерата, не соответствующее современным требованиям (неудовлетворительная стабильность химсостава, вызванная использованием в шихте трех концентратов вместо двух по проекту);
- проектное содержание окатышей в шихте ДП №5 <32%;
- дефицит агломерата АГЦ-3;
- дефицит окатышей с высоким содержанием железа;
- отсутствие возможностей использования скрапа сталеплавильного без дополнительного оборудования;

3. Относительно низкий уровень качественных характеристик производимого и используемого на ПАО «Северсталь» кокса. Показатели его механической прочности M40 и истираемости M10 были на 14% и на 4%, соответственно, ниже лучших мировых достижений, а показатели «горячих» прочностных характеристик (CSR) меньше на 25% (отн.). За счет использования значительной доли дешевых низкометаморфизованных углей себестоимость череповецкого кокса была достаточно низкой.

4. Относительно невысокий уровень производительности агломерационных машин, который определялся, в первую очередь, спецификой работы на тонкоизмельченных железорудных концентратах Оленегорского и Ковдорского месторождений, низкой газопроницаемостью слоя агломерационной шихты, отсутствием дешевых интенсификаторов агломерационного процесса. Показатель

удельной производительности агломашин ПАО «Северсталь» составлял 1,05 - 1,15 т/(м²·ч), что на 10 – 20 % ниже лучших мировых достижений. Уровень использования в агломерационной шихте вторичных продуктов металлургического передела не превышал 52 кг/т агломерата.

5. Недостаточная оптимизация режима работы группы доменных печей. Высокая удельная производительность малых доменных печей №1 и №2 (на уровне лучших мировых достижений) при относительно низкой удельной производительности крупнейшей в Европе ДП №5, что определялось неудовлетворительным для печей большого объема качеством кокса. Расход металлургического кокса на производство чугуна находился на уровне лучших для России показателей, при этом расход суммарного топлива соответствовал среднеевропейскому уровню. Продолжительность кампаний доменных печей оставалась на уровне проектных показателей, что ниже лучших мировых практик в 1,5 - 2 раза. Средний для России уровень использования в шихте малых доменных печей вторичного сырья (20 - 30 кг/т чугуна сталеплавильного шлака и скрапа) при полном отсутствии техногенного сырья в составе шихты ДП №5.

1.2 Металлургические свойства железорудных материалов с повышенным содержанием железа

Одним из наиболее эффективных направлений, позволяющих существенно улучшить технико-экономические показатели работы доменных печей (снизить расход топлива, повысить производительность, улучшить экологическую обстановку в регионе) является повышение металлургических свойств железорудной части доменной шихты.

Исследование влияния повышения содержания железа в доменной шихте на технико-экономические показатели доменного процесса, проведённые 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 % [5]. 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% ниже [6, 7].

Начиная с 70-х годов двадцатого века ведущие зарубежные металлургические предприятия пошли по пути увеличения содержания железа общего в доменной шихте и повышения металлургических свойств агломерата и окатышей в целом. Ввод в состав железорудной части шихты богатых бразильских и австралийских концентратов и аглоруд, содержащих менее 1% SiO_2 и около 70% $\text{Fe}_{\text{общ}}$, позволил на металлургических предприятиях США, Японии, ФРГ уменьшить удельный расход сырья до 1610 – 1620 кг/т чугуна. Эти изменения не затронули черную металлургию СССР и стран СНГ, где традиционно сохранялось использование руд собственных месторождений [8]. Запасы железных руд России сопоставимы с запасами Австралии или Южной Америки, однако содержание железа в российских рудах (28 – 35 %) существенно уступает австралийским и бразильским (58 – 62 %).

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 . Исследования показали, что основность агломерата и содержание SiO_2 оказывают существенное воздействие на процесс спекания и качество конечного продукта. Особое влияние содержание SiO_2 оказывает на свойства продукта аглопроцесса. Так, при неизменной основности агломерата (в диапазоне 1,2 - 2,2) его барабанная прочность и восстановимость повышаются в случае снижении содержания SiO_2 (в диапазоне 3,5 – 6 %) [9].

Высокое содержание железа в доменной шихте позволило ведущим мировым кампаниям в дальнейшем успешно осваивать технологию доменной плавки с использованием высокой доли заменителей кокса, в частности, пылеугольного топлива (ПУТ). Результаты опытных плавов, проведенных с использованием агломератов с пониженным содержанием SiO_2 , показали, что для повышения расхода ПУТ со 150 до 200 кг/т чугуна содержание SiO_2 в агломерате должно быть

менее 4 %, а восстановимость – более 70 % [10]. Повышение содержания железа в шихте приводит к тому, что доля первичного шлакообразования с высоким содержанием FeO , которое восстанавливается только прямым путем, существенно сокращается и это приводит к сокращению расхода кокса и повышению экономических показателей производства.

В работах специалистов по доменному производству было показано, что процессы формирования расплавов из агломератов и окатышей имеют принципиальные отличия [11, 12]. Так, исследования высокотемпературных свойства агломерата и окатышей с содержанием $\text{SiO}_2 \sim 4,8 - 6,5$ показали, что при формировании расплава из неофлюсованных окатышей, самоплавких кусковых руд, частично офлюсованных окатышей и агломерата с основностью (CaO/SiO_2) менее 0,8 ед. вначале образуются и отделяются от железорудного слоя первичные шлаки с высоким содержанием FeO , затем происходит совместное отделение металлоуглеродистого расплава и промежуточного шлака через коксовую насадку. В коксовой насадке остается незначительное количество неплавких масс.

При проплавке агломератов основностью 1,1 – 1,5 ед., практически во всем интервале температур происходит совместное истечение первичных шлаков и металлоуглеродистого расплава. Содержание FeO в первичных шлаках из агломератов, как правило, находится в пределах 6 – 12 % в отличие от 67 – 72 % - из неофлюсованных и 28 – 36 % - частично офлюсованных окатышей. Остаток расплава в слое кокса не превышает 10 – 12 %.

Проплавка высокоосновных агломератов (CaO/SiO_2 более 1,6 ед.) протекает с первоначальным отделением металлоуглеродистого расплава, затем с повышением температуры происходит совместное отделение металла со шлаком, а в коксовом слое остается 25 – 30 % тугоплавкого остатка с высоким содержанием оксидов кальция и магния, что снижает порозность коксовой насадки и ухудшает газораспределение в доменной печи. Таким образом, 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.

1.3 Влияние повышенной доли окатышей в шихте на результаты работы доменных печей

В настоящее время основными видами железорудного сырья для доменной плавки по-прежнему остаются агломерат и окатыши. Каждый из них имеет свои преимущества и недостатки. В условиях работы доменных печей на двух видах железорудного сырья основным резервом повышения содержания Fe в доменной шихте, как правило, является увеличение доли окатышей. Главными преимуществами окатышей по сравнению с агломератом являются их более высокая стойкость к разрушениям в исходном состоянии и при восстановительно-тепловой обработке, меньшие колебания химического и гранулометрического составов, пониженное содержание кремнезема, снижение общего количества шихты и выхода шлака.

В условиях работы доменных печей на двухкомпонентной шихте, состоящей, в основном, из агломерата и окатышей увеличение доли последних при загрузке конусными загрузочными устройствами (КЗУ) сопровождается колебаниями состава шлаков и теплового состояния горна печей, что может привести к повреждению футеровки низа шахты и сокращению длительности кампании доменных печей. Использование окатышей вызывает определенные сложности, связанные с проблемой их рационального распределения по сечению печи, необходимостью повышения основности агломерата, резким снижением газопроницаемости при увеличении содержания фракции (0 - 5 мм), повышенным выносом колошниковой пыли, низкой температурой полной потери газопроницаемости железорудного слоя, высоким содержанием оксида железа в первичном расплаве [13, 14].

Ввод в шихту окатышей, особенно частично офлюсованных, требует расхода дополнительного флюса в доменной плавке, увеличивает расход тепла на

диссоциацию карбонатов и понижает восстановительный потенциал печного газа при выделении в поток диоксида углерода. Большая доля окатышей в шихте создает проблемы с условиями образования и стойкостью гарнисажа в печи, сохранением футеровки шахты заплечиков, горна и системы охлаждения. Увеличение содержания окатышей в шихте может негативно повлиять на технологию плавки и эксплуатационную надежность доменных печей, привести к значительному увеличению горизонтального (бокового) распирающего давления шихты на футеровку в верхней части шахты печи в результате разбухания окатышей при их восстановлении, что вызывает повышенный износ футеровки шахты и снижение экономичности работы печей [15]. Кроме того, при увеличении доли окатышей в шихте в пристеночной зоне низа шахты печи, распара и заплечиков при излишне загруженной периферии, в первичных шлаках может наблюдаться повышенное содержание FeO и развиваться активное химическое взаимодействие футеровки с высокоокисными первичными шлаками 16 .

Восстановимость неофлюсованных окатышей ниже, чем у агломерата, но с увеличением основности окатышей показатели восстановимости агломерата и окатышей сближаются. Основным преимуществом разноосновной шихты, состоящей из высокоосновного агломерата и неофлюсованных окатышей, является высокая горячая прочность окатышей, что предопределяет пониженное сопротивление шихты газовому потоку и способствует интенсификации доменной плавки дутьем за счет уменьшения верхнего перепада.

В конце XX века количество окатышей в шихте доменных печей на европейских и советских заводах колебалось в пределах от 10 % до 60 %, а на предприятиях Северной Америки более половины доменных печей работали с долей окатышей более 55 %, а 15 % доменных печей – более 85 % [17]. На некоторых доменных печах США и Канады использовали окатыши с очень высоким содержанием железа (более 67 %) и, соответственно, минимальным содержанием пустой породы; кокс с высокими прочностными характеристиками и минимальным содержанием золы; обогащенное кислородом воздушном дутье.

В последние десятилетия ввиду специфики подготовки руд к плавке (глубокое обогащение, развитие процесса окомкования и т.п.), а также снижения производства агломерата доля окатышей в доменной шихте постепенно увеличивалась и на ряде заводов Западной Европы и Америки достигла 80 – 100%. В настоящее время содержание агломерата и окатышей в доменной шихте в разных странах существенно отличаются. В Бразилии, Японии, Южной Корее, Канаде, на некоторых печах США содержание агломерата в шихте превышает 70%. В других странах (Швеции, Голландии, на некоторых печах Японии и др.) в связи с малой агломерационной мощностью или ее отсутствием плавку ведут с высокой долей окатышей [18, 19] (таблица 1.1). Некоторые свойства окатышей, используемых на зарубежных меткомбинатах, представлены в таблице 1.2. [20, 21].

Таблица 1.1 – Показатели работы доменных печей Европы и США с высокой долей окатышей в шихте (2000-2010 гг.)

Показатели	Металлургическое предприятие			
	Fnsteel Koverhar (Финляндия)	SSAB Svenskt Stal AB (Швеция)	U.S. Steel Corp (США)	
			Great Lakes Works	Gary Works
Доменная печь	1	3	В	8
Объем печи (рабочий), м ³	567	2540	1645	1299
Производительность, т/(м ³ сутки)	2,63	2,45	2,28	2,43
Расход шихтовых материалов, кг/т чугуна				
Сухой кокс и орешек	356,30	322,40	389,00	339,00
Коксовый орешек	16,80	9,00	12,00	6,00
Агломерат	0	0	0	101
Окатыши (CaO+MgO)/SiO ₂ >0,5	1419	1363	2	903
Окатыши (CaO+MgO)/SiO ₂ <0,5	0	0	1478	361
Известняк	132	76	150	88

Показатели	Металлургическое предприятие			
	Fnsteel Koverhar (Финляндия)	SSAB Svenskt Stal AB (Швеция)	U.S. Steel Corp (США)	
			Great Lakes Works	Gary Works
Дутье				
Расход. М³/т чугуна	835	947	1103	1037
Давление, бар	1,79	3,56	2,90	2,70
Содержание O₂, %	27,80	23,80	23,30	25,10
Температура, °С	1166	1112	983	974
Расход ПУТ, кг/т чугуна	0,00	141,20	123,00	104,00
Расход мазута. Кг/т чугуна	109,70	0,00	0,00	0,00
Теоретическая	2282	2144	1976	2044
Колошниковый газ				
Температура, °С	113	138	100	95
Степень использования СО, доля единицы	0,528	0,553	0,507	0,475
Шлак				
Выход шлака, кг/т чугуна	171	158	175	нд
Основность 				

Доменные печи SAAB в Лелео (Швеция) в течение более 10 лет проплавливали богатые оливиновые окатыши ($MgO = 2\%$, SiO_2 от 1,5 до 2,7 %). Metallургические свойства таких окатышей и их поведение в печи аналогичны агломерату. Стабильная работа печей достигалась улучшением конструктивных особенностей печи, связанных с охлаждением шахт и контроля состояния гарнисажа. Удельная производительность печей достигала 3,64 т/(м³·сут), расход кокса 280-300 кг/т чугуна, суммарный расход топлива 450 - 460 кг/т чугуна и выход шлака 150 - 170 кг/т чугуна. Из-за низкой основности оливиновых окатышей использовали сырой флюс. Попытки офлюсовать оливиновые окатыши известью для исключения

загрузки в печь сырого флюса вызвали появление спеков окатышей, что существенно ухудшило сход шихты в печи.

Таблица 1.2 – Основные показатели качества окатышей, используемых за рубежом

Показатели	Вид окатышей		
	кислые	основные	офлюсованные
Fe _{общ} , %	64-67	60-64	60-63
CaO, %	0,3-0,8	2,7-5,5	3,8-7,2
SiO ₂ , %	2 – 5	3,5 – 5,5	3,5 – 5,5
MgO, %	<0,2	1,3	1,3-2,2
Основность CaO/ SiO ₂ , ед.	<0,15	0,8-1,0	1,1-1,3
Прочность окатышей, кг/окатыш	250-300	200-250	200-250
Прочность окатышей на сжатие более 200 кг/окатыш, %	>90	>80	>80
Содержание мелочи 5-0 мм, %	<3	<3	<3

Из-за различных негативных последствий и недостаточной проработки вопроса технология доменной плавки с повышенной долей окатышей на отечественных меткомбинатах долгое время не получала такого развития, как за рубежом. На большинстве металлургических предприятий РФ расход окатышей в железорудной части шихты составляет ~20 - 40 % и лишь в доменных печах Саткинского и Косогорского металлургических заводов достигает 80 - 100 % [22].

В отечественной металлургии первую опытную плавку с использованием в шихте до 100 % офлюсованных известняком окатышей провели на Магнитогорском металлургическом комбинате (ММК) в 1966 г., но из-за их неудовлетворительной прочности устойчивой работы печи добиться не удалось. По мере улучшения качества окатышей производительность печи возрастала, а расход кокса уменьшался и к 1969 г. при использовании в доменной шихте 50 - 100% окатышей суточная выплавка чугуна возросла на 3,1 - 3,5 %, а расход кокса сократился на 1,2 - 1,3 %. Полная замена агломерата окатышами в опытной плавке

привела к увеличению содержания MgO в конечном шлаке с 6,7 до 13,5 %, что заметно ухудшило его текучесть при временном понижении нагрева чугуна и шлака, привело к прогарам фурм и значительным затруднениям с выпуском продукции [23].

На доменных печах ММК в 1972 г. переход от офлюсованных доломитом окатышей к неофлюсованным привел из-за ускоренного износа футеровки и холодильников печи к массовому выходу из строя холодильников шахты, распара и моратора, к увеличению бокового давления материалов в нижней половине шахты вследствие улучшения газопроницаемости верхней части столба шихты. В современных условиях при повышении доли окатышей в работе доменных печей ОАО «ММК» наблюдаются такие же проблемы. Нарушения в службе холодильников начинаются через 3 - 6 месяцев после превышения доли окатышей в шихте 60 %, причиной чего является отсутствие условий для формирования гарнисажа [24].

Повышение расхода окатышей ЦГОК (г. Кривой Рог) в доменных печах комбинатов Украины, несмотря на увеличение содержания железа на 3 - 3,5% по сравнению с агломератом, приводило к ухудшению технических показателей доменной плавки. Производительность печи снижалась в среднем на 0,8 % при повышении доли окатышей на каждые 10 %, а расход кокса увеличивался на 0,9 % [25]. Эффект от замены агломерата неофлюсованными окатышами был близок к нулю из-за образования в нижней части шахты конгломератов с низкой газопроницаемостью.

На ДП № 2 АО «Уральская сталь» объемом 1232 м^3 в процессе гарантийного испытания было поэтапно увеличено содержание окатышей Михайловского ГОКа ($Fe_{\text{общ}} = 60,5 \text{ %}$, $CaO/SiO_2 = 0,5 \text{ ед.}$) с 55 до 95,1 % [26]. При этом корректировка газопроницаемости проводилась путем изменения системы загрузки через снижение содержания окатышей на периферии, увеличения в зоне рудного гребня и промежуточной зоне между периферией и рудным гребнем.

С увеличением доли окатышей в шихте ДП № 1 АО «Уральская Сталь» объемом 1007 м^3 ухудшились газодинамические условия плавки. Стабилизировать

их удалось заменой неофлюсованных окатышей на офлюсованные. В результате пришли к выводу, что для минимизации расхода кокса и высокопроизводительной работы доменных печей в условиях АО «Уральская Сталь» необходимо использовать 40 – 45 % офлюсованных или 20 – 25 % «кислых» окатышей в шихте. Повышение расхода окатышей при сохранении эффективности доменной плавки возможно только при улучшении их высокотемпературных свойств в результате оптимизации основности и увеличения содержания MgO, влияющего на структуру и свойства силикатной связи [27].

Улучшению технологических показателей доменного процесса и получению качественного чугуна способствует введение в состав неофлюсованных окатышей магнийсодержащих компонентов, поскольку такие окатыши имеют более высокую температуру размягчения и плавления, а работа на магнезиальных шлаках повышает их температурную устойчивость и десульфуризационную способность. В работе [28] показано, что повышение содержания MgO в шлаке в большей степени способствует десульфурации чугуна, чем повышение его первой основности. Присутствие в окатышах магнийсодержащих компонентов существенно меняет характер их поведения в доменной печи при восстановительно-тепловой обработке в процессе плавки [29].

В состав окатышей оксид магния вводят либо с магнийсодержащими флюсами (доломитизированный известняк), либо в виде оливинов (природный минерал в виде силиката магния и железа $(\text{Mg, Fe})_2\text{SiO}_4$). Практика показывает, что оливиновые окатыши с содержанием $\text{SiO}_2 < 3\%$ обеспечивают высокие показатели доменной плавки при 100 %-м содержании их в шихте и хорошо сочетаются с технологией вдувания ПУТ до 200 кг/т чугуна.

Сравнительные результаты промышленных плавов на различных видах окускованного сырья показали низкую эффективность использования окатышей с повышенным содержанием железа в силу разных причин, главным образом, из-за их недостаточной прочности в условиях восстановительно-тепловой обработки [30].

Переход доменных печей на работу с повышенной долей окатышей в шихте сопровождается образованием пылеватых фракций при их восстановлении и необходимостью использования сырого известняка для компенсации низкой основности, а увеличение расхода сырого известняка до 150 - 200 кг/т чугуна существенно ухудшает показатели доменной плавки [31].

Замена офлюсованного агломерата неофлюсованными окатышами и совместная проплавка неофлюсованных окатышей с высокоосновным агломератом приводит к расширению зоны когезии из-за использования в шихте нескольких видов железорудного сырья с различной способностью к размягчению [32, 33]. Анализ результатов промышленных опытов показал необходимость офлюсования окискованных материалов для полного вывода сырого флюса из доменной шихты, при этом степени офлюсования агломерата и окатышей должны быть близкими [34].

В зависимости от состава и высокотемпературных свойств в окатышах может образовываться большое количество вюститного материала, который при относительно невысокой температуре (1000 – 1050 °С) превращается в жидкость, выделяющуюся при разрыве металлической оболочки. Чем больше кремнезема в составе окатышей, тем больше масса расплава (фаялита), обладающего агрессивными свойствами, вызывающими разрушение кокса, что приводит к неустойчивости процесса доменной плавки, негативно влияет на характер формирования и стабильность продуктов плавки [35]. Попытки ослабить негативное влияние рядовых окатышей при восстановительно-тепловой обработке в печи на образование агрессивных жидких фаз путем повышения их основности до уровня основности агломерата оказались экономически невыгодными из-за значительных затрат на измельчение до тонкого состояния большого количества флюсов. В связи с этим долгое время бытовало мнение, что долю окатышей в доменной шихте нужно ограничить величиной 10 – 25 %, особенно на предприятиях, где есть агломерационное производство. Превышение этого предела возможно при увеличении основности окатышей и повышении содержания в них магнезии, а также улучшении распределения их на колошнике [36].

При большом содержании неофлюсованных окатышей в шихте ухудшаются защитные свойства гарнисажа и увеличивается количество вышедших из строя холодильников в нижней части шахты, распаре и заплечиках из-за образования кислых первичных шлаков, содержащих 25 - 40% FeO, и роста горизонтального давления шихты при увеличении газопроницаемости в верхней части печи [37].

Комплексная оценка влияния неофлюсованных окатышей на показатели работы доменных печей показывает, что увеличение доли окатышей в шихте с 28 до 100% может приводить к увеличению производительности печи и росту удельного расхода кокса [38]. Причиной повышения расхода кокса является ухудшение восстановимости и газопроницаемости нижней части столба шихты и связанные с этим колебания теплового состояния горна и снижение использования восстановительной способности газов [39].

При переводе доменной плавки на режим работы с высокой долей неофлюсованных окатышей в шихте из-за различия в физико-механических свойствах агломерата и окатышей, а также вследствие высокой агрессивности первичных шлаков, получающихся из неофлюсованных окатышей необходимо менять основные параметры шлакового режима и загрузки материалов в печь [40].

Анализ опыта работы доменных печей с повышенной долей окатышей позволил определить условия их эффективного использования [41]:

- постоянный контроль качества окатышей – стабильность химического состава и качества, низкая истираемость, высокая прочность (в том числе, и в горячем состоянии);
- поддержание оптимального содержания SiO_2 и MgO в окатышах, обеспечивающих их лучшую восстановимость, и снижение до определенных пределов количества закиси железа в первичных шлаках;
- уменьшение колебаний химсостава железорудного сырья, в особенности по основности и содержанию Al_2O_3 и MgO ;
- подбор условий загрузки, обеспечивающих оптимальное распределение материалов на колошнике и постоянный контроль радиального газораспределения;

- совершенствование системы охлаждения доменной печи;
- применение качественных огнеупоров, стойких по отношению к шлакам и абразивному воздействию шихты;
- повышение стойкости загрузочных устройств;
- максимальное сближение основности окатышей и агломерата;

При рассмотрении последствий воздействия различных типов окатышей на ход доменной плавки необходимо особо учитывать: в верхней части доменной печи – разрушение окатышей с образованием мелкой фракции, ухудшающей показатели работы доменной печи; в нижней части шахты доменной печи – низкие температуры полной потери газопроницаемости железорудного слоя (усадка 45%) и высокое содержание FeO в первичных шлаках [42]. Выбор типа используемых окатышей зависит от требований, предъявляемых конкретным потребителем, и может изменяться под влиянием дополнительных факторов: изменение баланса флюсов на предприятии, переход на агломерат другой основности, изменение параметров работы доменных печей в результате проведения капремонтов и других причин.

1.4 Особенности работы группы доменных печей

Экономия энергоресурсов в технологии доменной плавки может быть достигнута, как отмечается в работе [43], за счет повышения содержания железа в железорудной части шихты, повышения степени использования восстановительного потенциала газа, повышения температуры дутья и снижения потерь тепла в системе охлаждения доменной печи. Как показывает практика, изменение какого-либо одного параметра, направленного на снижение энергозатрат малоэффективно, наибольший эффект достигается при совместном изменении нескольких переменных. Особенно это актуально для группы доменных печей, режим работы которых имеет некоторые особенности по сравнению с работой отдельной доменной печи. Главным преимуществом является возможность перераспределения материальных и энергетических ресурсов между

разными печами с учетом различного их влияния на режим работы, экономичность плавки и качество продукции. Для каждой доменной печи при определенных условиях и параметрах плавки характерны свои количественные зависимости расхода кокса и производительности от интенсивности плавки, которые определяются совокупностью шихтовых, технологических, конструктивных и организационных условий и поставленной задачи.

Поскольку технологические показатели работы отдельных доменных печей существенно разнятся, оптимизация распределения топливно-энергетических ресурсов играет важную роль в повышении эффективности всего доменного передела. В теории, в общем случае, процедура оптимизации сводится к многошаговому процессу перераспределения небольших величин общего ресурса между печами с определением на каждом шаге изменения отдельного параметра по критерию наилучших результатов для всей группы печей [44]. Такой подход применим к различным параметрам работы доменных печей – расходу кокса, кислорода, природного и коксового газов.

Было показано, что наибольшая экономия кокса по группе печей достигается при таком его распределении, когда небольшое изменение топливно-энергетических ресурсов на каждой из печей вызывает одинаковое изменение расхода кокса на всех печах [45, 46].

Согласно [47], с целью обеспечения минимального суммарного расхода кокса для группы печей технический кислород частично или полностью передают от печей с температурой дутья выше критической на печи с температурой дутья ниже критической, а топливные добавки перераспределяют в обратном порядке при поддержании теоретической температуры в пределах 1700 – 2500 °С.

Оптимизация по расходу коксового газа предполагает такое его перераспределение между различными доменными печами, при котором при близких значениях температуры дутья на разных доменных печах целесообразно подавать его в смеси с природным газом на все доменные печи в одинаковом соотношении, поддерживая в дутье всех печей одинаковую объемную долю кислорода. Это позволит минимизировать расход кокса по всем печам за счет

улучшения полноты превращения углеводородов в фурменных очагах доменных печей.

В случае существенного различия температуры дутья на доменных печах целесообразно на печах с большой температурой дутья поддерживать несколько большую объемную долю коксового газа и меньшую объемную долю кислорода. Это позволит улучшить работу газового потока в целом по всем печам за счет поддержания коксовой насадки на всех доменных печах в более активном состоянии.

Как по критерию производительности, так и по критерию расхода кокса оптимальным является такое распределение сырья между доменными печами, при котором содержание железа в шихте всех печей одинаково.

В случае применения как высокосернистого, так и низкосернистого кокса на разных доменных печах целесообразно на печах, загружаемых высокосернистым коксом, в большей мере повышать температуру дутья, увеличивать расход природного газа и проводить мероприятия по увеличению степени использования газов, чем на остальных печах. Это будет способствовать большей экономии высокосернистого кокса и сокращению общего прихода серы с шихтой.

Для уменьшения суммарного расхода кокса для группы доменных печей разработан такой способ работы доменных печей, при котором расход вдуваемого природного газа или другой топливной добавки перераспределяют между доменными печами пропорционально разности между коэффициентом замены кокса топливной добавкой на каждой печи и средневзвешенным коэффициентом замены в группе печей цеха [48].

1.5 Работа доменных печей с низким выходом шлака

1.5.1 Химический состав и основные свойства доменных шлаков

Одним из резервов повышения эффективности технологии доменного производства в переменных шихтовых условиях является определение рационального шлакового режима. Качество выплавляемого чугуна в процессе

доменной плавки в значительной мере определяют физико–химические свойства шлака, тем самым оказывая влияние на расход различных энергоносителей и эффективность плавки.

Шлаки подразделяют на первичный, промежуточный и конечный доменный шлак. Первичный шлак отличается непостоянством химического состава, который зависит от качества материалов, распределения материалов и газов по сечению печи, расхода горючего, температуры дутья и других факторов. Химический состав первичных шлаков, согласно [49], колеблется в пределах: 30 – 40 % SiO_2 ; 11 – 20 % Al_2O_3 ; 27 – 35 % CaO ; 1,5 – 6 % MgO ; 5 – 8 % MnO ; 3 – 18 % FeO и 0,1 – 0,7 % S. Многочисленные исследования [50] процессов шлакообразования в доменных печах, выполненные путем отбора проб материалов по высоте и сечению печей, показали [51], что состав первичных шлаков и горизонт образования шлака непостоянны.

Промежуточный шлак образуется, преимущественно, в нижней части заплечиков – верхней части горна и по химическому составу близок к составу конечного шлака (содержание SiO_2 (35 – 38 %) и CaO (39 – 45 %)), однако содержание оксидов металлов далеко от состава в конечном шлаке [52].

Состав конечного шлака различается в зависимости от вида выплавляемого чугуна (передельный, литейный, ферросилиций и т.д.), который для наиболее распространенного передельного чугуна содержит: 32 – 40 % SiO_2 ; 6 – 14 % Al_2O_3 ; 32 – 45 % CaO ; 6 – 15 % MgO ; 0,1 – 1,5% MnO ; <0,5% FeO , 1 – 2 % TiO_2 . При химическом анализе определяют еще соединения K_2O , Na_2O . Основные компоненты шлака — SiO_2 , Al_2O_3 , CaO по суммарному содержанию составляют в конечном шлаке 90–95 % [52].

Качественный и количественный химический состав определяет основные свойства шлака, такие как температура плавления, вязкость и серопоглотительная способность. Эти характеристики зависят от содержания в шлаке основных и кислотных окислов, отношение суммарного содержания которых определяют основность шлака ($O_{\text{ш}}$, %) согласно уравнению 1.1:

$$O_{\text{ш}} = \frac{(CaO + MgO)\%}{(SiO_2 + Al_2O_3)\%} \quad (1.1)$$

При этом пренебрегают содержанием FeO и MnO из-за их малой величины в конечном шлаке. Нужно отметить, что оксид алюминия (III) является амфотерным окислом и может проявлять как кислотные свойства, так и свойства щелочные, а основность MgO приблизительно в 2 раза меньше, чем у CaO [53]. Поэтому часто под основностью шлака подразумевают отношение CaO/SiO_2 , особенно при неизменности MgO и Al_2O_3 для сравнения шлаков. «Основные» шлаки ($CaO/SiO_2 > 1$), как известно [52], неустойчивы при изменении состава и температуры. Зависимость вязкости шлака от температуры неодинакова для кислых и основных шлаков. Это связано с тем, что основные шлаки при охлаждении склонны к образованию кристаллических структур, возникновению гетерогенности и как следствие скачкообразному увеличению вязкости. В кислых шлаках, в отличие от основных, при понижении температуры вязкость шлака снижается плавно. Увеличение SiO_2 в кислых шлаках приводит к образованию полимерных ассоциатов $(SiO_4)^{2-}_n$, повышению аморфности шлаковой массы и склонности к стеклованию. При этом суммарная основность с учетом всех входящих компонентов определяет температурный режим и поведение шлакового расплава.

Температура плавления шлаков является определяющей для оценки количества тепла, поступающего в металлоприемник печи. С повышением температуры плавления шлак при прочих равных условиях приходит в горн более прогретым и наоборот. Шлаки с высокой температурой плавления переходят в жидкое состояние на более низком горизонте печи и опускаются к фурмам нагретыми до более высокой температуры, обеспечивая при этом нормальные газодинамические условия в шахте печи. Однако количество тепла, приходящее в горн со шлаком, во многом зависит и от текучести шлаков. Шлаки, обладающие низкой температурой плавления (кристаллизации), но имеющие недостаточную текучесть, также хорошо аккумулируют тепло и приходят в металлоприемник

достаточно прогретыми. Поэтому температура шлака в металлоприемнике определяется не только расходом кокса и температурой дутья, но и нагревом поступающих продуктов плавки. Однако, следует заметить, что чугун, образующийся практически всегда при стабильной температуре, стекает в горн с примерно одинаковыми скоростями и теплосодержанием. Теплота же нагрева шлака различна и зависит от температуры его плавления. Если шлак приходит в горн нагретым до более высокой температуры, то и горн будет более “горячим”. Отсюда вытекает давно принятое положение: тугоплавкий шлак “греет” горн, легкоплавкий – “охлаждает”.

Энтальпия (теплосодержание) доменных шлаков включает затраты тепла на нагрев их до температуры плавления (в том числе, теплоту химических реакций и теплоту плавления) и перегрев до заданной температуры, что влияет на тепловой баланс в нижней части доменной печи и расход топлива доменной плавки. Поэтому при оптимизации шлакового режима предпочтение следует отдавать шлакам с минимальной энтальпией образования [50, 54]. Энтальпия шлаков системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ колеблется от 1470 до 1890 кДж/кг [55]. На выпуске доменной плавки она в значительной степени зависит также и от содержания других компонентов. Энтальпия натуральных доменных шлаков, по данным [50] находится в пределах 1865 - 1903 кДж/кг при температуре хорошей текучести, соответствующей вязкости 3 пуаза (0,3 Па×с). Поскольку величина энтальпии шлаков влияет на тепловой баланс в нижней части доменной печи и нагрев горна, то минимизация энтальпии способствует экономии кокса.

Для ведения доменной плавки определяющее значение имеет температура, при которой шлак может свободно течь, а не температура плавления шлака в целом. Данные диаграмм температур плавления шлаков и диаграмм теплоты плавления не дают полного представления о его вязкости и технологических свойствах. Вязкость шлака, как свойство, имеющее определяющее влияние на доменный процесс, выделяет значительное число исследователей [49, 54, 56]. Анализ литературных источников [54, 57] показывает, что шлаки должны быть достаточно подвижными и устойчивыми, а процесс шлакообразования должен протекать в ограниченном

пространстве, что уменьшает потери напора газа и способствует получению необходимой газопроницаемости. Так, вязкость при температурах 1330°C и 1500°C должна находиться в диапазонах 1,2 – 2,5 Па·с и 0,25 – 0,5 Па·с, соответственно. Температура плавления, с формированием оптимальных по газопропускной способности свойств шлака, должна находиться в диапазоне 1280 – 1350°C. Однако чрезмерно подвижные шлаки обладают недостаточной способностью к аккумуляции тепла из-за быстрого их схода по высоте печи и охлаждают металлоприемник. Шлаки должны не только стекать в металлоприемник, но и хорошо прогреваться, что особенно важно для промежуточных шлаков зоны заплечиков. При поступлении в нижние слои столба шихты их подвижность не должна существенно увеличиваться. В то же время, вязкость конечного шлака не должна быть высокой, чтобы шлак обеспечивал достаточную дренажную способность, высокий потенциал десульфурации и необходимую текучесть на стадии выпуска.

Из литературных источников известно [55], что нормальный конечный доменный шлак на выпуске должен иметь вязкость в пределах 0,25 – 0,5 Па·с. При переходе от нормальных шлаков к «длинным» кислым их вязкость повышается. Особенно сильно она возрастает при содержании в шлаке более 50 % SiO₂. Еще резче увеличивается вязкость основных шлаков при повышении содержания СаО сверх 52 – 53 % («короткие шлаки»). Эти данные подтверждаются и материалами работы [50], в которой показано, что для нормальной работы доменной печи вязкость шлака должна находиться в более широком интервале 0,3 – 0,8 Па·с. Оптимальной на выпуске из горна, по данным [58], является вязкость 0,3 Па·с.

По данным [50, 54, 55] нормальные конечные доменные шлаки перегреты выше температуры плавления на 200 °С. При выплавке передельного чугуна температура шлака достигает 1450 – 1550 °С, следовательно, их температура плавления находится в интервале 1250 - 1350 °С. Аналогичные соображения изложены в работах [59, 60], где утверждается, что температура кристаллизации (затвердевания) шлаков не должна превышать 1270 – 1300 °С, а в работе [57] показано, что для условий форсированного хода доменных печей верхний предел

температуры плавления рекомендован в интервале 1300 – 1350 °С. Более высокая температура плавления приводит к образованию гарнисажа, сокращению (зарастанию) рабочего пространства горна и вызывает трудности удаления продуктов плавки.

Вязкие шлаки могут вызывать ухудшение газопроницаемости в зоне шлакообразования, появление настывей, ухудшение процессов массопереноса, в том числе десульфурации и процессов восстановления. При работе на вязких и тугоплавких шлаках, с одной стороны, учащаются случаи горения фурм, наблюдаются подвисание шихты, загромождение горна, усложняется выпуск продуктов плавки. С другой стороны, легкоплавкие, слишком подвижные шлаки приводят к нестабильности температуры горна и могут разрушить гарнисаж и футеровку печи.

Рекомендации относительно оптимальных величин поверхностного натяжения конечных доменных шлаков в литературе отсутствуют. Однако значение этого свойства в доменной плавке неоднократно подчеркивалось. В частности, исследованиями [61, 62] показано, что поверхностное натяжение шлака не должно быть меньше 370 мН/м, а между величиной поверхностного натяжения и серопоглотительной способностью шлаков существует обратная зависимость [63].

Химический состав в сочетании с вязкостью шлака оказывает существенное влияние на его десульфурующую способность и на восстановимость других элементов. Более подвижный и более основный шлак способствует лучшему восстановлению железа, марганца, других элементов, а также процессу десульфурации чугуна. Согласно [64], сера в доменных шлаках содержится в виде сульфидов CaS , MnS и FeS . При выплавке передельного чугуна 85 – 90 % общего количества серы, поступающей с шихтой в печь, переходит в шлак. Распределение серы между чугуном и шлаком (за вычетом серы, переходящей в колошниковый газ) зависит от физико-химических свойств шлака и его относительного количества. Степень обессеривания выражается коэффициентом распределения серы, равным: $L_S = (S)/[S]$, где (S) , $[S]$ – содержание серы в шлаке и чугуне,

соответственно. Серопоглолительная способность является одной из количественных оценок рафинирующих свойств шлака при получении чугуна заданного качества. Оптимальные условия для десульфурации обуславливают основность шлака, содержание в нем магнезии, достаточный нагрев горна и длительность выдержки его в горне.

Для экономичной доменной плавки количество шлака должно быть оптимальным, что определяется взаимоисключающими условиями. С одной стороны, чем больше относительное количество шлака, тем больше ошлаковывается серы, с другой стороны, чем меньше относительное количество шлака, тем лучше газопроницаемость шихты, ровнее ход печи, ниже расход кокса.

1.5.2 Влияние содержания магнезии на свойства и характеристики доменного шлака

Снижение вязкости шлака и облегчение хода плавки в печи на сегодняшний день часто стремятся обеспечить достаточно высоким содержанием MgO в шлаке. Увеличение содержания оксида магния в доменном шлаке обычно достигается путем использования доломитизированных известняков в составе флюсующих компонентов при агломерации железорудных концентратов. На основании анализа исследований, представленных авторами работы [50], можно утверждать, что часть оксида кальция в доменном шлаке может быть заменена оксидом магния и при этом активность шлака не снизится. Увеличение содержания MgO в шлаке можно корректировать уменьшением отношения CaO/SiO_2 .

Увеличение содержания магнезии в конечном шлаке ведет к увеличению его плотности при низких температурах, а в интервале температур 1500 – 1550 °C эта разница постепенно сглаживается. Данная картина полностью подтверждает литературные сведения о том, что увеличение MgO делает шлак менее устойчивым, приводя к более резкому изменению его физико-химических свойств [65].

Опыт использования бакальских сидеритовых руд показывает, что при использовании одних сидеритовых руд в шихте доменных печей содержание

магнезии в шлаке будет составлять более 30 %. Автор работ [66, 67], исследуя особенности высокомагнезиальных шлаков системы $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO} - \text{CaO}$ показал, что шлаки с содержанием 30 % MgO при температуре 1400 °C получаются практически твердыми. Следовательно, одни сидеритовые руды вследствие их высокой основности и значительного содержания магнезии не могут проплавляться в доменных печах.

Исследование влияния плавкости и вязкости расплава конечных доменных шлаков на процесс ведения доменной плавки проводили по степени фильтруемости промежуточного шлака через коксовую насадку в условиях различного содержания и минеральной формы MgO [68]. Изменение содержания MgO в агломерате производили путем варьирования доли бакальского сидерита в аглошихте. В ходе лабораторного эксперимента было обнаружено, что положительное влияние оксида магния на фильтруемость шлака имеет экстремальный характер, при этом существенное влияние оказывает основность агломерата. Авторы отмечают увеличение фильтруемости шлака на 25,1 % (отн.) с повышением содержания MgO (до 3%) при условии увеличения основности с 1,8 до 2,2. При этом было установлено, что вид магнийсодержащих материалов (доломит, сидерит, дунит, аглофлюс) влияет на фильтруемость шлака через коксовую насадку больше, чем концентрация MgO в железорудных материалах.

Следует отметить, что промышленные опыты по введению магнезиальных добавок (сырой доломит, сырой и обожженный сидерит, сырой и обожженный дунит) непосредственно в доменную шихту, как минимум, не улучшали показателей плавки, что связано как с дополнительными затратами тепла и времени на разложение карбонатов, гидратов и формирование шлака, так и с ухудшением однородности шихты из-за локализации в ней добавок [69].

Оптимальное содержание MgO в доменном шлаке зависит от конкретных условий ведения процесса, а природа магнийсодержащих добавок различным образом влияет на показатели доменного процесса, что можно установить только экспериментальным путем.

Глубокое обогащение руд и снижение выхода шлака является одной из наиболее важных тенденций современного развития доменного производства. В настоящее время на различных доменных печах выход шлака варьируется в широком диапазоне от 150 - 160 до 480 - 500 кг/т чугуна. Технология малошлаковой плавки с выходом шлака менее 250 кг/т чугуна имеет как существенные преимущества, так и недостатки. С одной стороны, она улучшает технико-экономические показатели доменного передела, приводит к снижению расхода шихтовых материалов и способствует значительному уменьшению удельных затрат на выплавку чугуна. С другой стороны, снижение выхода шлака и, соответственно, уменьшение запаса тепла в горне доменной печи предъявляет более жесткие требования к качеству шихтовых материалов и кокса, а также их распределению по сечению колошника доменной печи, что обеспечивает заданный состав и свойства первичных и промежуточных шлаковых расплавов.

Разработка оптимального режима проведения доменной плавки в части обеспечения формирования шлакового режима должна проводиться таким образом, чтобы плавкость шлаков была на рациональном уровне и при этом обеспечивалась достаточная их жидкоподвижность, аккумуляция тепла, развитие процессов обессеривания, восстановления, газопропускная и дренажная способности.

Из проведенного анализа литературы следует, что для обеспечения устойчивого технологического состояния доменной печи и выплавки чугуна заданного качества должны быть соблюдены определенные требования к свойствам шлаков в доменной плавке:

- первичные шлаки, определяемые сырьевыми условиями, должны быть достаточно однородны по составу по сечению печи. На развитие процессов газораспределения и восстановления негативно сказываются локальные образования разнородных по свойствам первичных шлаков. Такие шлаки являются результатом неравномерности их формирования и способствуют растягиванию зоны шлакообразования по высоте печи. При неустойчивом шлакообразовании, возможно, как образование жидких фаз, так и их сгущение. Это, как правило, ведет

к образованию настывлей и развитию агрессивного воздействия на футеровку печи. Поэтому важно обеспечение устойчивой зоны шлакообразования.

- процесс шлакообразования должен протекать в ограниченном пространстве с формированием оптимальных по газопропускной способности свойств шлака (подвижность, вязкость), что уменьшает потери напора газа и способствует организации необходимой газопроницаемости. Только на участке от фурменного очага до распара теряется до 30 - 45 % кинетической энергии газового потока. Узкий и достаточно близкий интервал размягчения и расплавления смеси железосодержащих материалов и флюсов сокращает участок наибольшего гидравлического сопротивления печи.

- шлаки должны быть достаточно подвижными и устойчивыми. Соблюдение этого требования определяется не только температурой плавления и вязкостью, но также и гомогенностью образующегося шлака. Однако не следует стремиться к получению чрезмерно подвижных шлаков, обладающих недостаточной аккумуляцией тепла из-за быстрого их схода по высоте печи и охлаждающих металлоприемник. Шлаки должны не только хорошо стекать в металлоприемник, но и хорошо прогреваться. Это очень важно для промежуточных шлаков зоны заплечиков. При поступлении в нижние слои их подвижность не должна сильно увеличиваться. В то же время, вязкость конечного шлака не должна быть большой, чтобы шлак обеспечивал хорошую дренажную способность, высокую десульфурирующую способность и хорошую текучесть на выпусках.

1.6 Анализ опыта применения природного газа и водорода в металлургии, перспективы развития и экологические аспекты

Успешное освоение технологии доменной плавки с вдуванием через воздушные фурмы природного газа началось в октябре 1957 г., когда на доменной печи завода им. Петровского подача в горн природного газа в количестве до 120 м³/т чугуна позволила снизить расход кокса на 10 – 16 % и повысить производительность печи на 3 – 5%. Так, впервые в мировой практике доменного

производства была освоена технология плавки с использованием природного газа на атмосферном дутье [70].

Освоение этой технологии позволило достичь высоких технико-экономических показателей. К концу 70-х годов на печах ЧерМК, ММК и других комбинатах отрасли удалось увеличить удельную производительность доменных печей до 2,0 – 2,3 т/м³ объема печи и снизить удельный расход кокса при выплавке передельного чугуна до 420 – 460 кг/т чугуна.

Использование технологии комбинированного дутья коренным образом изменило температурно-тепловое состояние горна, состав горновых газов и, в целом, распределение температур по высоте печи. Содержание водорода в горновых газах увеличилось с уровня 1,5 – 2,5 % до 6,0 – 8,5 %, существенно увеличив степень использования восстановительных газов в “сухой” зоне доменной печи. Основным результатом вдувания природного газа оказалось существенное снижение удельного расхода кокса.

В то же время анализ работы доменных печей на комбинированном дутье, содержащем природный газ и кислород, показал, что достигнутые результаты на разных заводах и доменных печах одного и того же завода существенно отличались. Так, коэффициент замены кокса природным газом колебался от 0,6 до 1,1 кг/м³, прирост производительности печи на дополнительный процент кислорода составлял от 1,0 до 3,5 %, существенно колебалось использование восстановительного потенциала газов.

Следующим этапом развития технологии замены кокса более дешевым дополнительным топливом можно считать технологию доменной плавки с использованием коксового газа. Впервые промышленные испытания технологии вдувания коксового газа, в котором более 50% составлял водород, в условиях работы доменной печи завода «Запорожсталь» с применением природного газа были проведены в 1966 г. [71]. Было показано, что при замене примерно половины поступающего в печь природного газа удвоенным количеством коксового газа производительность печи повышается на 3,4%, а расход кокса снижается на 1,2 %. Максимальная эффективность новой технологии была достигнута при вдувании

смеси коксового и природного газов в количестве 80,2 м³/т чугуна и 31,7 м³/т чугуна, соответственно. Положительные результаты эта технология показала, в значительной мере, за счет более ровного хода печи, что позволило, с одной стороны, при сохранении перепада давления повысить удельный расход воздушного дутья, и, следовательно, интенсивность плавки (на 2,6 %), а, с другой стороны, увеличить количество восстановительных газов, то есть, снизить степень прямого восстановления.

В дальнейшем, при освоении технологии использования коксового газа, был достигнут стабильный ход печи при вводе в доменную печь смеси коксового газа и природного с расходом 300 м³ на 1 т чугуна [72, 73]. В отдельные сутки расход смеси газов доходил до 350 м³/т чугуна. В этом периоде содержание водорода в коксовом газе изменялось в пределах 52 – 54 %. Необходимо отметить, что коэффициент замены кокса восстановительным газом в этих условиях зафиксирован в пределах 0,4 - 0,6 кг/м³.

Стремление к снижению себестоимости чугуна за счет уменьшения затрат на доменный кокс с увеличением расхода природного газа на тонну чугуна в большинстве случаев не реализованы в широкой практике, чаще всего, из-за кратковременности улучшения и последующего несоответствия предполагаемой и действительной эффективности такого технологического режима. Чаще всего наблюдалось уменьшением коэффициента замены кокса природным газом при большом (от 100 до 200 м³/ т чугуна) расходе газа с уровня 0,8 до 0,6 кг/м³ на т чугуна, снижение стабильности и управляемости плавки.

Уже первые исследования процессов, сопровождающих применение природного газа, проведенные академиком З.И. Некрасовым и др. [74] показали, что углеводороды природного газа в зависимости от условий могут не только гореть, но и разлагаться с выделением сажистого углерода, ухудшающего условия дренажа жидких продуктов плавки. Это приводит к повышению нестабильности состава чугуна, ввиду ухудшения свойств шлака за счет образования на нем плохо проницаемых пленок сажистого углерода. Эти особенности процессов высокотемпературного превращения природного газа обуславливают

несоответствие уровня расчетной теоретической температуры у фурм увеличенному расходу природного газа, что вызывает необходимость поиска оптимального состава и условий применения комбинированного дутья, в частности, соотношения концентрации кислорода и расхода природного газа.

Экспериментально было установлено [75, 76], что эффективность обогащения дутья кислородом после 24 – 26 %, начинает уменьшаться, а расход кокса увеличивается, несмотря на увеличение расхода природного газа. Известны эффекты «захлебывания» печи при использовании дутья с концентрацией кислорода выше 25 %, что приводит к ограничению возможностей варьирования количественных параметров при оптимизации соотношения газов в составе комбинированного дутья.

Изучение влияния технологии использования комбинированного дутья на работу доменных печей показало, что ввод природного или коксового газа в доменную печь увеличивает содержание водорода в горновых газах. В условиях работы доменных печей с использованием природного газа содержание H_2 в колошниковом газе при уровне расхода природного газа 120 – 160 м³/т чугуна составляет 8 – 12 %.

Увеличение доли водорода в газах доменных печей приводит к существенным изменениям в технологии доменной плавки. Отмечалось, что присутствие в горновых газах повышенного содержания водорода, обладающего меньшей плотностью, облегчает, по – видимому, сход шихтовых материалов. В результате наблюдается снижение или сохранение перепада давления на участке «горн – колошник», несмотря на увеличение выхода горновых газов.

В связи с этим повышение эффективности использования природного газа в доменной плавке должно быть основано на изучении и теоретическом осмыслении особенностей изменений, происходящих в доменной печи, оценке влияния водорода природного газа на изменение теплового и восстановительного процессов, разработку технологических приемов ведения плавки, позволяющих увеличить степень использования водорода и снизить расход кокса.

В последние годы актуальность таких исследований резко возросла в связи с важностью проблемы охраны окружающей среды, активизацией экологического аспекта ведения доменного процесса с использованием водорода.

В настоящее время черная металлургия потребляет ~ 8% мирового объема энергии и производит ~ 7% выбросов CO_2 [77], что приводит к увеличению загрязнения воздуха и увеличению парникового эффекта. Поскольку значительная доля энергозатрат в металлургии приходится на уголь, все более актуальными становятся новейшие низкоуглеродистые технологии на основе создания и внедрения принципиально новых технологических схем и процессов. Европейский проект «Green Steel» в соответствии с Парижским соглашением 2017г. в области климата и энергетики предполагает к 2050 г. за счет конкретных низкоуглеродистых технологий сократить выбросы углекислого газа в черной металлургии на 80 – 95 % (по сравнению с 1990 г.) [78]. Основную роль должны сыграть повышение материалоеффективности (на 40 %), производительности (на 21 %) и улавливание выбросов (на 16%) [79]. Причем, если до 2030 г. 90 % годового сокращения выбросов будет обеспечивать, в основном, улучшение технологических показателей и эффективности использования материалов, то в более долгосрочной перспективе – инновационные технологии, такие, например, как применение водорода.

Аналогичные прогнозы дает и Международное энергетическое агентство (МЭА): с 2020 г. по 2050 г. прогнозируется, что улучшение технологических показателей, а также повышение эффективности использования материалов и различных видов топлива на основе традиционных технологий даст ~ 75 % сокращения совокупных выбросов [80].

Однако, хотя водород позиционируют, как экологически чистое топливо для транспорта и энергетики, почти половину его мирового объёма получают из природного газа (метана) и его производство создаёт массу парниковых выбросов в виде углекислого газа. Более того, производство водорода высвобождает в атмосферу массу метана, чья способность создавать парниковый эффект в десятки раз выше, чем у CO_2 . [81].

И все же металлургию будущего все чаще называют водородной. Хотя в настоящее время водород обходится дорого, а его получение, хранение и транспортировка осложняются множеством чисто технических проблем, появляется все больше разработок, позволяющих получать водород с низкой себестоимостью.

По прогнозам «Bloomberg New Energy Finance» уже к 2030 г. «зеленый» водород при цене ~\$ 2/кг начнет конкурировать с углем и природным газом в качестве энергоносителя при производстве стали, а к 2050 г. при цене \$ 1/кг станет выгоднее газа и сможет конкурировать с самым дешевым углем при нулевой эмиссии CO₂. За счет водорода произойдет своего рода окончательная электрификация мировой промышленности [82].

По менее оптимистичным прогнозам международного агентства возобновляемой энергетики «IRENA» к 2025 г. водород будет стоить 4 – 6 \$/кг с перспективой снижения цен до 2 \$ /кг к 2040 г. [83].

Тем не менее в Японии намерены к 2030 г. сократить выбросы парниковых газов, как минимум, на 46 %, а к 2050 г. достичь нулевого уровня [84].

Прогнозируется, что уже к 2030 г. спрос на водород может вырасти на треть за счет новых промышленных применений, значительная часть из которых придется на черную металлургию [85]. Компания «Thyssenkrupp Steel» впервые [86] начала строительство пилотных установок подачи водорода в доменную печь на крупнейших металлургических комбинатах мира и первой подала в доменную печь водород в качестве дополнительного восстановителя, что дало возможность успешно завершить первый этап водородных испытаний на одной из фурм ДП №9 в Дуйсбурге в феврале 2021 г. На втором этапе, предполагалось распространить этот метод на все 28 фурм доменной печи, что открывает путь для крупномасштабного промышленного использования. Однако, при реализации проекта компания столкнулась с проблемой транспортировки водорода, который для первого этапа испытаний доставлялся грузовиком. Для решения этой проблемы в марте 2021 г компания «Salzgitter» ввела в строй первую в немецкой

металлургической промышленности установку, которая представляет собой собственный водородный электролизер [87].

Несмотря на значительный прогресс в сокращении потребления различных ресурсов, энергоэффективность черной металлургии все еще требует совершенствования характеристик технологических процессов и более рационального использования материалов.

На протяжении последних лет интенсифицировались поиски основных направлений повышения эффективности использования природного газа в доменном производстве, которые основываются на результатах теоретического и практического моделирования влияния водорода природного газа на изменение теплового и восстановительного процессов по высоте и радиусу доменной печи, исследований поведения углеводородов природного газа в фурменной области, процессов смешения природного газа с кислородом воздуха, особенностей процессов теплообмена и восстановления железорудных материалов в присутствии водорода.

Выводы по разделу 1

1. Основными требованиями к работе доменных печей на сегодня являются экономичность и возможность оперативного изменения уровня производства и состава выплавляемого чугуна с минимальными потерями при работе в переходных режимах.

2. Целью настоящей работы является разработка 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 выбросам CO_2 , к которым относятся:

- выбор рационального шлакового режима и отработка технологических приемов, обеспечивающих повышение устойчивости хода доменной плавки в изменяющихся шихтовых условиях;

- разработка новых подходов к решению задач оптимизации состава угольной шихты, обеспечивающей заданный уровень качественных характеристик кокса

- освоение технологии доменной плавки с высокой долей окатышей и низким выходом шлака при увеличении количества вторичных ресурсов в агломерационной и доменной шихте;

- эффективное использование рационального количества природного газа, исследование влияния водорода на процессы восстановительно-тепловой обработки железорудных материалов в высокотемпературной зоне;

- активизация экологического аспекта ведения доменного процесса на основе разработки новых приемов плавки с повышенным использованием природного газа.

3. Для разработки технологических и организационных мероприятий, обеспечивающих повышение конкурентоспособности производства чугуна необходимы исследования:

- влияния состава и количества шлака на качественные характеристики чугуна при проплавке железорудных шихт с использованием различных видов твердого топлива;

- изучение взаимосвязей состава и количества первичного шлака с показателями процесса науглероживания чугуна при плавке с использованием кокса различного качества;

- влияния повышения содержания MgO в конечном доменном шлаке до 14,5% на результаты плавки;

- влияния щелочных элементов на изменение характеристик коша в рабочем пространстве доменной печи.

2. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ С НИЗКИМ ВЫХОДОМ ШЛАКА И ВЫСОКОЙ ДОЛЕЙ ОКАТЫШЕЙ В ЖЕЛЕЗОРУДНОЙ ЧАСТИ ШИХТЫ

2.1. Исследование закономерностей формирования расплава при использовании железорудной шихты с низким содержанием SiO_2

Увеличение интенсивности работы доменной печи и снижение удельного расхода энергоресурсов на выплавку чугуна являются в настоящее время основными направлениями в совершенствовании технологии доменной плавки. Выполнение жестких требований к металлургическим свойствам железорудного сырья и кокса должны в комплексе обеспечивать движение к снижению себестоимости чугуна за счет уменьшения расхода условного топлива, что в свою очередь обеспечивается повышением содержания железа в железорудной шихте и переходу к малошлаковой плавке. В поиске резервов для снижения себестоимости чугуна без снижения его качественных характеристик в условиях оптимального шлакового режима совершенно необходимы исследования зависимости металлургических свойств (плавкости, прочности, восстановимости) окискованного сырья от химического состава, критерии выбора оптимальной основности агломерата и соотношения агломерат/окатыши в доменной шихте.

Использование в шихте доменных печей №№ 1, 2, 4, 5 ПАО «Северсталь» низкокремнистых офлюсованных окатышей Костомукшского горнообогатительного комбината для реализации малошлаковой технологии в доменной плавке потребовало проведения лабораторных исследований поведения данного вида шихты в высокотемпературных условиях. Были проведены лабораторные плавки окатышей и агломерата различной основности, в том числе с низким содержанием диоксида кремния (менее 3 %) для определения высокотемпературных свойств полученной шихты.

Исследование закономерностей формирования жидких фаз из окатышей переменной основности с низким содержанием SiO_2 проводили по методике, позволяющей определять температурные диапазоны областей размягчения, плавления и капельного течения расплава через коксовую насадку, а также массу и химический состав первичных шлаковых и металлоуглеродистых расплавов [12, 88, 89]. Для изучения характера формирования жидких фаз в процессе восстановительно - тепловой обработки с последующей фильтрацией расплавов

через слой кокса (коксовую насадку) использовали установку, в которой предварительно восстановленные железорудные материалы загружались на коксовый слой и нагревались со скоростью 30 °С/мин до 1000 °С, затем – 7°С/мин до 1600 °С. В ходе опыта фиксировали начало фильтрации расплава через коксовую насадку ($T_{\text{нф}}$, °С), массу первичного шлака ($M_{\text{пш}}$, %), определяли в нем содержание оксида железа ($\text{FeO}_{\text{пш}}$, %), оценивали количество и состав «зависшего» в коксовой насадке непрофильтрованного остатка ($M_{\text{ост}}$, %).

Лабораторные плавки агломерата и окатышей проводили на коксовой насадке различного качества. Характеристики коксовой насадки и часть результатов исследований представлены в таблицах 2.1-2.2.

Таблица 2.1 – Качественные характеристики кокса, используемого в лабораторных плавках

Название	Зола	Влага	S	CRI, %	CSR, %
Кокс 1	11,9	0,5	0,54	32,6	53,0
Кокс 2	13,3	0,6	0,86	39,3	44,2

CRI, % - показатель реакционной способности кокса;
CSR, % - показатель горячей прочности кокса

Количество FeO в первичном шлаковом расплаве ($m \text{FeO}_{\text{пш}}$, %) вытекшего из образца, предварительно прошедшего восстановительную обработку (согласно ГОСТ 21707-76) и профильтрованного 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% (рисунок 2.1).

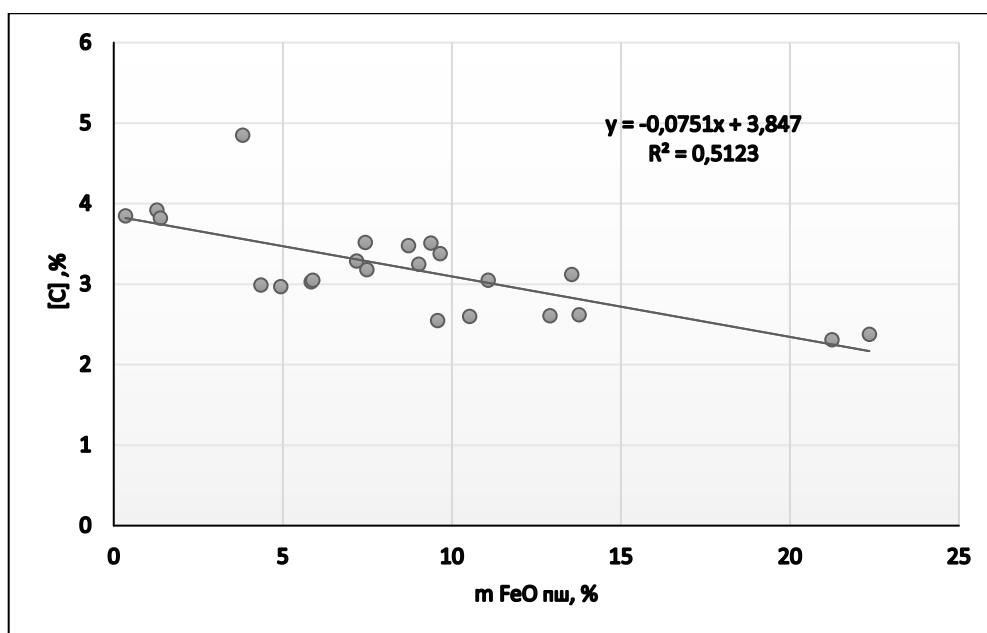


Рисунок 2.1 – Изменение содержания углерода [C] (%) в промежуточном металлоуглеродистом расплаве в зависимости от количества FeO в первичном шлаковом расплаве - $m \text{ FeO}_{\text{пш}}$ (%)

Анализ результатов лабораторных плавов железорудных материалов различного химического состава и способа окускования показал (см. таблицу 2.2), что высокотемпературные показатели лабораторных окатышей при снижении содержания SiO_2 в целом заметно повышаются при любом уровне офлюсования. Значения температур потери газопроницаемости слоя и начала фильтрации жидких фаз через коксовую насадку повышаются на 25 – 50 °C на каждые 2 % снижения SiO_2 (в зависимости от уровня офлюсования). Также с уменьшением содержания SiO_2 в железорудном материале уменьшается масса высокозакисного первичного шлакового расплава и содержание в нем монооксида железа. Количество остатка расплава в слое кокса, ухудшающего газодинамику низа доменной печи, при высоких температурах увеличивается незначительно.

Для неофлюсованных или частично офлюсованных железорудных материалов показатели высокотемпературных характеристик железорудного сырья отличаются сильнее, чем для материалов с высоким уровнем основности.

Таблица 2.2 – Высокотемпературные свойства железорудных материалов с различным содержанием SiO₂.

№ №	Наименование материала	Исходный состав			Коксо вые насадки	Темпер атура начала фильтра ции, °С	Содержание FeO в первичном шлаке, %	Масса,%		m FeO _{пш} , %	Содержание в металлоуглеродистом расплаве, %	
		Содержание, %		Основ ность CaO/ SiO ₂				первичного шлака	расплава в слое кокса		C	S
		MgO	SiO ₂									
1	Окатыши	0,18	3,0	0,18	Кокс 1	1355	79,83	12,0	10,6	9,58	2,55	0,170
					Кокс 2	1340	79,70	13,2	10,6	10,52	2,6	0,245
2	Окатыши	0,21	5,1	0,21	Кокс 1	1305	76,35	16,9	8,0	12,90	2,61	0,160
					Кокс 2	1300	78,20	17,6	9,2	13,76	2,62	0,24
3	Окатыши	0,23	7,4	0,23	Кокс 1	1275	75,08	28,3	7,0	21,24	2,31	0,158
					Кокс 2	1265	76,30	29,3	7,8	22,35	2,38	0,24
4	Окатыши	0,18	2,8	0,55	Кокс 1	1380	33,40	14,8	8,9	4,94	2,97	0,125
					Кокс 2	1365	35,60	16,4	8,2	5,84	3,03	0,220
5	Окатыши	0,18	4,9	0,58	Кокс 1	1355	35,61	21,0	9,0	7,48	3,18	0,120
					Кокс 2	1340	38,40	23,5	8,8	9,02	3,25	0,210
6	Окатыши	0,25	7,1	0,52	Кокс 1	1320	34,60	32,0	12,0	11,07	3,05	0,118
					Кокс 2	1310	38,90	34,8	11,1	13,54	3,12	0,210
7	Окатыши	0,14	2,9	0,81	Кокс 1	1400	29,82	14,6	12,5	4,35	2,99	0,098
					Кокс 2	1380	34,60	17,0	10,6	5,88	3,05	0,185
8	Окатыши	0,18	5,2	0,78	Кокс 1	1375	32,62	22,0	9,0	7,18	3,29	0,090
					Кокс 2	1350	36,50	23,9	8,4	8,72	3,48	0,180
9	Окатыши	0,16	7,2	0,82	Кокс 1	1335	36,42	26,5	8,7	9,65	3,38	0,088
10	Окатыши	1,0	3,6	0,21	Кокс 1	1374	52,80	14,1	8,8	7,44	3,52	0,075
11	Окатыши	1,2	5,5	0,18	Кокс 1	1352	55,15	17,0	9,4	9,38	3,51	0,064
12	Окатыши	2,5	3,11	0,33	Кокс 1	1390	41,40	9,2	10,7	3,81	4,85	0,06
13	Агломерат	2,1	4,87	1,27	Кокс 1	1481	4,90	7,20	16,5	0,35	3,85	0,055
14	Агломерат	2,05	5,15	1,20	Кокс 1	1430	8,56	14,8	14,5	1,27	3,92	0,058
15	Агломерат	1,8	3,8	1,10	Кокс 1	1420	10,94	12,6	12,8	1,38	3,82	0,065

В условиях малошлаковой плавки вопросы десульфурации чугуна обуславливают необходимость более глубокого анализа. Сера, циркулирующая в доменной печи, поглощается как шлаком, так и металлом. Характер перехода серы в шлак по ходу плавки достаточно хорошо известен из литературы [90]. Менее изучены вопросы, связанные с переходом серы из кокса в металлоуглеродистый расплав в процессе его формирования, как отдельной фазы.

Для изучения этого вопроса в лабораторных условиях был исследован процесс перехода серы в металлоуглеродистый расплав при проплавке различного состава окатышей и агломерата на коксах, значительно различающихся по содержанию серы и реакционной способности. Было найдено, что содержание серы в металлоуглеродистых расплавах, образованных из шихтовых материалов равной основности с низким содержанием SiO_2 , в исследованном диапазоне химического состава на 7 – 10 % (отн.) выше, чем при проплавке высококремнистого железорудного сырья.

Из данных таблицы 2.2 видно, что содержание серы в промежуточном металлоуглеродистом расплаве выше, чем ее содержание в конечном чугуне. Наиболее значимым фактором, влияющим на содержание серы в промежуточном расплаве, кроме общепринятых факторов (таких как содержание серы в составе кокса и основность железорудной шихты), является содержание углерода в металлоуглеродистом расплаве, связанное как с химическим составом железорудной шихты, так и с реакционной способностью кокса.

Анализ влияния реакционных свойств кокса на характер формирования жидких фаз по данным таблицы 2.2 показывает, что уменьшение показателя горячей прочности кокса (соответственно, увеличение его реакционной способности) существенно влияет на высокотемпературные характеристики железорудного сырья. Так, при снижении показателя горячей прочности кокса с 53,0 % до 44,2 % температуры начала фильтрации жидких фаз понижаются на 10 – 25 °С, масса первичного высокозакисного расплава и содержание в нем FeO увеличивается на 7,0 – 12 % (отн.) и 3 – 5 % (отн.), соответственно. Для

неофлюсованных окатышей влияние реакционной способности кокса проявляется в меньшей степени, чем для окатышей основностью 0,8 ед. и агломератов.

2.2 Освоение технологии доменной плавки с низким выходом шлака в условиях увеличения содержания MgO на коксах различного качества

Опытные плавки при освоении технологии получения чугуна с ограниченным содержанием серы и кремния в условиях малошлаковой доменной плавки и снижении расхода кокса проводились с использованием в шихте агломерата с различным содержанием MgO, окатышей Костомукшского ГОКа с содержанием SiO₂ -3,0 - 3,2 % и кокса с показателями горячей прочности (CSR) в пределах 43 - 61 %. В базовом периоде были использованы рядовые окатыши с содержанием диоксида кремния на уровне 6,2%.

Характерный химический состав и свойства рядовых и низкокремнистых окатышей, а также показатели доменной плавки с окатышами различного качества приведены в таблицах 2.3 – 2.4.

Таблица 2.3 – Химический состав и свойства рядовых и низкокремнистых окатышей

Параметры		Окатыши	
		Рядовые	Низко-кремнистые
Химический состав, %	Fe	63,35	66,0
	FeO	2,10	0,90
	SiO ₂	5,04	3,06
	CaO	3,65	2,27
	MgO	0,22	0,20
	Al ₂ O ₃	0,33	0,29
	Na ₂ O	0,047	0,036
	K ₂ O	0,126	0,08
	CaO/SiO ₂	0,72	0,74
Исходная прочность ИСО 4700			
Прочность, кг/ок		214	206
Низкотемпературная прочность ЖРС после восстановления (аналог ИСО 4696-2)			
LTD + 6,3, %		76,4	73,2
LTD (0 – 3,15), %		13,4	16,3
LTD (0 – 0,5), %		11,6	12,5
Восстановимость при 900 °C, % (Rf)		48,2	49,5

Параметры	Окатыши	
	Рядовые	Низко-кремнистые
Высокотемпературные свойства		
Температура полной потери газопроницаемости слоя ($T_{45\%}$), °C	1200	1232
Температура начала фильтрации жидких фаз $T_{нф}$, °C	1350	1395
Содержание FeO в первичном шлаке ($FeO_{пш}$), %	36,17	35,7
Количество первичного шлака, ($M_{пш}$), %	29,4	23,8
Количество остатка расплава в слое кокса, ($M_{ост}$), %	7,2	7,9

Таблица 2.4 – Показатели работы доменных печей в базовом и опытном периодах

Доменная печь	№4		№5	
Полезный объем, м ³	2700		5500	
Период	Базовый (декабрь-октябрь) 2013	Опытный (март) 2014	Базовый 2013	Опытный (март) 2014
Фактическое производство чугуна (т/сутки)	6471	6652	11953	12503
Удельная производительность (т/м ³ полезн. объема в сутки)	2,397	2,46	2,173	2,28
Расход агломерата, кг/т чугуна	1054,4	993,1	1055	1032,7
Расход окатышей, кг/т чугуна	462	516,7	498,7	475,1
Расход кусковой железной руды, кг/т чугуна	26,3	26,6	20,7	28,3
Расход шлако-скраповой смеси, кг/т чугуна	73,1	25,2	14,8	15,1
Содержание Fe (общ.) в шихте, %	59,18	60,12	59,79	60,85
Расход сухого доменного кокса (кг/т чугуна)	422,8	415,5	423,0	417,2
Удельный расход природного газа, м ³ /т чугуна	90	93	96	89
Расход условного топлива (кг/т чугуна)	494,8	489,9	499,8	488,4
Расход дутья/воздуха (нм ³ /мин.)	4740	4775	8131	8248
Давление дутья (кПа)	3,34	3,44	4,05	4,06
Температура дутья (°C)	1224	1230	1173	1172
Влажность дутья (г/м ³)	10,99	11,43	9,63	9,76
Общий кислород в дутье (%)	26,04	27,10	28,31	28,04
Давление на колошнике (кПа)	1,93	1,94	2,11	2,15
Температура на колошнике (°C)	92	115	154	140
Выход шлака (кг/т чугуна)	289	265	250	244
Основность шлака (CaO+MgO)/SiO ₂)	1,27	1,31	1,32	1,32
Температура чугуна (°C)	1491	1483	1509	1501
[C], %	4,74	4,87	4,88	4,92
[Si], %	0,56	0,56	0,55	0,56
[S], %	0,02	0,016	0,019	0,022

Оценка химического состава железорудного сырья, лабораторные исследования качества рядовых и низкокремнистых окатышей, расчетно-аналитический прогноз поведения смеси железорудных материалов в процессе восстановительно-тепловой обработки, в том числе, по сечению доменной печи, показали:

- содержание железа общего, Fe (общ.), в окатышах при равной основности повысилось на 2,6 % (абс.);
- содержание щелочных элементов в низкокремнистых окатышах по сравнению с рядовыми офлюсованными понизилось 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;
- прочность в исходном состоянии и при низкотемпературном восстановлении в режиме отработки технологии производства окатышей снизилась на 3,7 % и 4,2%(отн.), соответственно;
- температурный уровень зоны размягчения, полной потери газопроницаемости железорудного слоя и капельного течения первичных шлаковых расплавов у низкокремнистых окатышей по сравнению с рядовыми повысился на 45 – 50 °С, что привело к увеличению объема сухой зоны доменной печи и повышению восстановимости железорудного сырья;
- для смеси железорудных материалов температурный уровень вязко-пластичной зоны в доменной печи в среднем повысился на 15 – 20 °С;
- содержание FeO в первичном шлаке и масса первичного шлака снизились на 0,5 % и 5,8 % (абс.), соответственно.

Использование в железорудной части доменной шихты 30 – 35 % низкокремнистых окатышей позволило в среднем сократить основность агломерата на 0,15 ед., что улучшило подготовку флюса к агломерационному процессу и стабилизировало основность спекаемого агломерата, а также сократило простои оборудования на внеплановые остановки. Показатели

высокотемпературных свойств агломерата и окатышей сблизились, повысив устойчивость технологического процесса плавки.

Сравнение технико-экономических показателей доменной плавки базового и опытного периодов подтвердило перспективность выбранного направления. Повышение содержания Fe (общ.) в шихте на 0,9 - 1,1% с уровня 59,2-59,8 до 60,1-60,9 % позволило сократить расход кокса на 1,7 – 1,4% и увеличить производительность доменных печей на 2,8 - 4,6 %. Более высокий уровень сокращения расхода кокса при повышении содержания железа общего в доменной шихте по сравнению с расчетом показателей доменной плавки в соответствии с технологической инструкцией, вероятнее всего, связан с улучшением высокотемпературных характеристик окатышей и уменьшением поступления щелочных элементов в доменную печь.

Технические возможности ведения процесса доменной плавки при содержании MgO в конечном доменном шлаке выше значений, определенных технологической инструкцией, проводились при увеличении доли ковдорского концентрата в составе агломерационной шихты.

Увеличение доли ковдорского концентрата в составе агломерационной шихты в начальный период освоения технологии агломерации сопровождалось снижением производительности агломашин на 0,7 – 1,8 %. После корректировки технологических параметров аглопроцесса (нагрева аглошихты, увеличения расхода шлаковой смеси и др.) производительность агломашин вернулась на уровень 280 тонн/час.

Опытно-промышленные испытания с поэтапным увеличением содержания MgO в шлаке до 14,5 % (в отдельных выпусках до 16 % т.е. выше значений 11,5-12,5%, определенных технологической инструкцией) проводились на ДП №5 объемом 5500 м³ (табл. 2.5) в условиях улучшенного качества кокса по горячей прочности ($CSR > 50\%$). При этом шлаковый режим устанавливался по суммарной основности шлака $(CaO+MgO)/SiO_2$ на уровне 1,30 ед. и снижении первой основности до 0,95ед.

Таблица 2.5– 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 Fe _{общ} в шихте, %	60,6	61,9
Расход сухого доменного кокса, кг/т чугуна	423,0	414,1
Удельный расход природного газа, м ³ /т чугуна	96	98
Расход дутья, нм ³ /мин	8131	8359
Выход шлака, кг/т чугуна	247	221
Основность шлака (CaO+MgO)/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

Среднее содержание железа в доменной шихте при увеличении доли ковдорского концентрата увеличилось с 60,56 до 61,85 % за счет роста содержания железа в агломерате АГЦ-3. Рост содержания железа привел к снижению выхода доменного шлака с 247 до 221 кг/т чугуна.

Влияние оксида магния на вязкость конечных шлаков в температурном диапазоне 1300 – 1600 °C представлено данными таблицы 2.5 и на рисунке 2.3. Повышение содержания MgO в конечном доменном шлаке с 11,5 % до 14,5 % приводит к повышению его вязкости в среднем на 10 – 15 %.

Период освоения технологии работы доменных печей с низким выходом шлака прерывался вынужденным переходом на кокс с низкими показателями горячей прочности и повышенной колеблемостью его реакционной способности, что в условиях малошлаковой плавки привело к появлению признаков загромождения горна ДП №5.

Таблица 2.6 – Химический состав и свойства шлаковых расплавов

Содержание компонентов, %	Значения				
	Средне- годовой уровень	Мини- мальное	Макси- мальное	Содержание MgO (опытная плавка), %	
				13,0	14,5
FeO	0,32	0,27	0,38	0,33	0,33
CaO	37,41	37,00	38,30	35,35	33,25
SiO ₂	37,37	36,00	38,70	36,71	36,39
MgO	11,98	11,70	12,40	13,07	14,50
MnO	0,324	0,190	0,480	0,153	0,166
Al ₂ O ₃	10,67	10,40	11,20	10,46	11,07
TiO ₂	1,19	0,98	1,40	1,61	1,89
S	0,962	0,780	1,120	0,927	0,926
R ₂ O	0,873	0,770	0,960	1,061	1,082
Свойства					
T _{нк} , °C	1369,67	1369,72	1368,65	1371,86	1371,64
T _{кк} , °C	1315,60	1315,69	1313,86	1319,34	1318,96
η ₁₅₀₀ , Па·с	0,3366	0,2895	0,4102	0,3600	0,3720
σ ₁₅₀₀ , мН/м	371,02	364,81	379,88	359,81	350,64
Энтальпия, кДж/кг	1848,10	1835,60	1858,47	1868,43	1889,75
Серопоглолительная способность, %	19,973	16,763	24,075	20,497	20,435
Выход шлака, кг/т чугуна	256	210	265	236	220

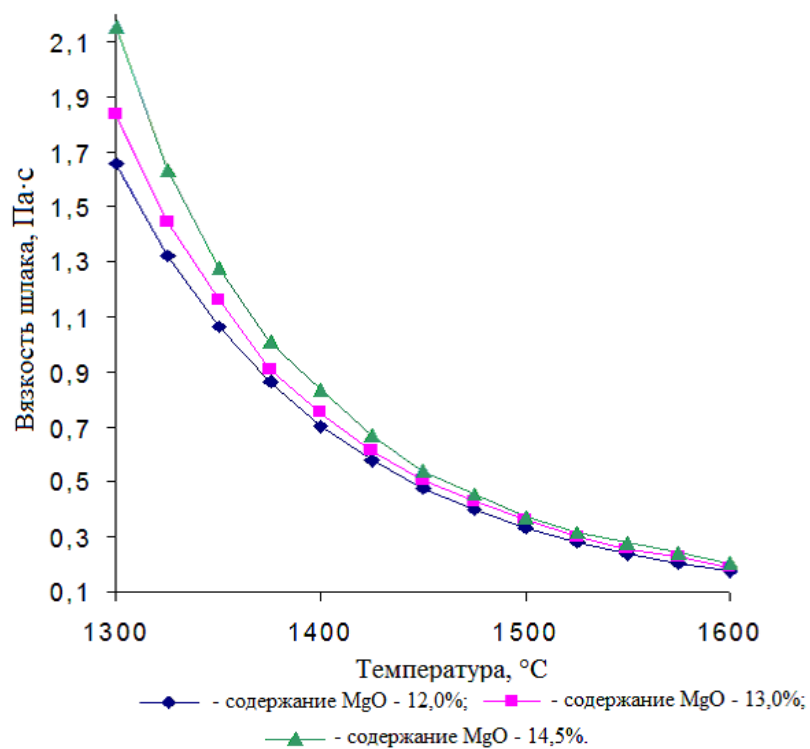


Рисунок 2.3 – Зависимость вязкости шлаков от температуры для разных уровней MgO

Результаты зондирования горна ДП №5 показали, что при работе на коксе низкого качества зона с пониженной проницаемостью («тотерман») увеличилась с 6 – 8% до 14 % объема горна на уровне фурм. Систематических “мягких” промывок горна от флюсовой составляющей и коксового мусора оказалось недостаточно, поэтому выход конечного доменного шлака в условиях работы ДП №5 поддерживали на уровне 240 - 250 кг/т чугуна путем ввода шлакового щебня [91].

Для обеспечения эффективного использования нескольких видов окатышей (в том числе, неофлюсованных), кокса различного качества, а также некондиционных фракций железорудных материалов и кокса были разработаны технологические требования к их загрузке и распределению на колошнике [92]. Опыт работы доменных печей показал, что совершенствование распределения шихтовых материалов на колошнике обеспечивает снижение удельного расхода кокса на 0,5 - 1,0 % [93].

При вводе в шихту неофлюсованных окатышей ужесточаются ограничения по содержанию FeO в первичном шлаке в пристеночной зоне доменной печи. В этом случае режим загрузки должен обеспечить минимальное содержание неофлюсованных окатышей у стенки доменной печи и концентрацию их основной массы в промежуточной зоне:

- в пристеночной зоне доменной печи содержание окатышей должно быть минимально возможным, обеспечивающим безопасное для футеровки содержание FeO в первичном шлаке;
- основная масса окатышей должна быть распределена в промежуточной зоне колошника с максимумом на расстоянии 0,70-0,80 радиуса колошника и убыванием в направлении пристеночной и осевой зон;
- в осевой зоне содержание окатышей также должно быть минимальным для предотвращения ухудшения газопроницаемости.

Такое распределение окатышей по радиусу колошника достигается путем выбора рациональных параметров формирования железорудных смешанных порций, в первую очередь, массы головной части порции из агломерата.

Количество FeO в расплаве нефлюсованных окатышей в два раза больше, чем в расплаве офлюсованных. С учетом этого, при наличии в шихте офлюсованных и нефлюсованных окатышей предложена эмпирическая формула (2.4) для определения головной части порции из агломерата:

$$C_A^{(r)} = 0,2 + k_r [(C_{\text{оош}} + 2 C_{\text{нош}}) - 0,2], \quad (2.4)$$

где $C_A^{(r)}$ – относительная масса головной части железорудной порции (отношение массы головной части к массе порции);

k_r – численный коэффициент ($k_r = 1,4$);

$C_{\text{оош}}$ – содержание офлюсованных окатышей в шихте, доли ед.;

$C_{\text{нош}}$ – содержание нефлюсованных окатышей в шихте, доли ед.

Было установлено, что минимально возможное содержание нефлюсованных окатышей в пристеночной зоне ДП № 5 обеспечивается при величине уставки начала выгрузки их дозы на конвейер, равной 50 % от массы порции (см. рисунок 2.4).

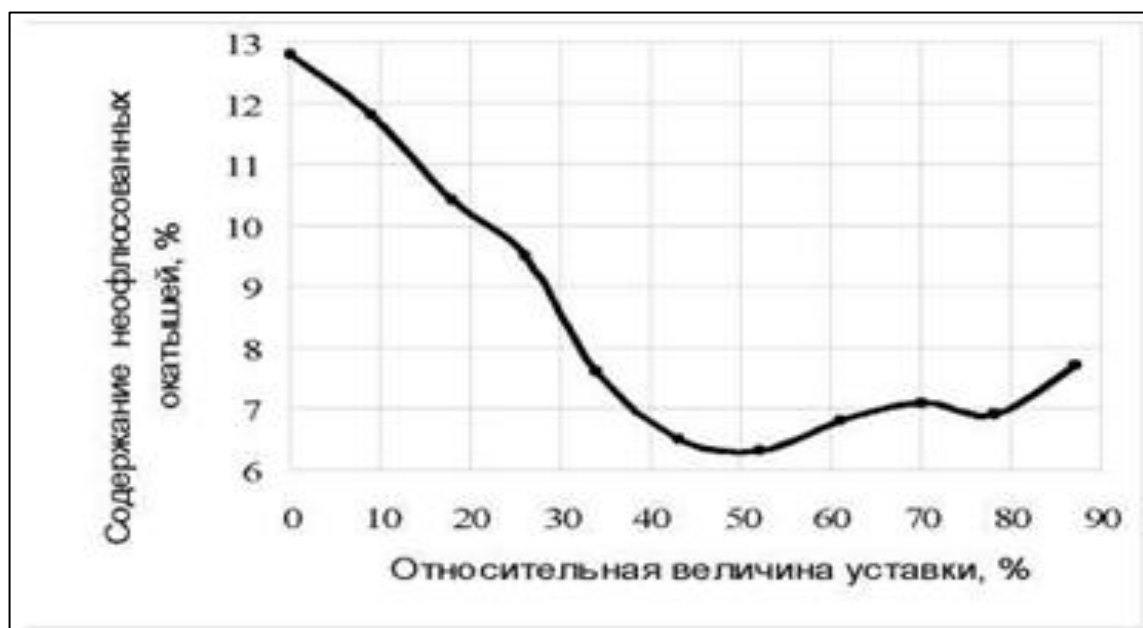


Рисунок 2.4 – Зависимость содержания нефлюсованных окатышей в пристеночной зоне ДП №5 от величины уставки начала выгрузки их дозы на конвейер при формировании железорудной части подачи

Разработанные технологические приемы и рациональные параметры их реализации обеспечили стабильную работу ДП №5 в условиях изменения количества и видов окатышей в шихте.

В ходе освоения новой технологии также столкнулись со следующими трудностями:

- сокращение выхода шлака на 11,5 – 16 % от общей массы шлакового расплава снижает теплосодержание расплава в горне доменной печи, приводит к снижению устойчивости доменной плавки и требует повышения качества кокса;
- уменьшение количества первичного шлакового расплава и содержания в нем FeO (в среднем на 6 – 10 %) усложнило самоочищение коксовой насадки в штатном режиме, поскольку активизировались периферийные потоки расплава в горне;
- при остановках доменных печей отмечено качественное изменение гарнисажа в околофурменной зоне: его толщина уменьшилась, а структура стала более рыхлой.

Повышение температур размягчения, плавления и капельного течения агломератов (по сравнению с базовым составом) отразилось на изменении температур кладки ДП №5 в зоне “верхний ряд заплечиков – низ шахты”, что, возможно, связано с более интенсивным обновлением гарнисажа. Содержание кислорода в дутье в опытных периодах практически не изменилось. Увеличение природного газа на 7 - 9 м³/т чугуна привело к снижению теоретической температуры горения (ТТГ) на 10 - 30 °С. В целом, доменная печь №5 с низким выходом шлака и повышенным содержанием MgO в нем работала стабильно и технологически устойчиво. Наилучшие результаты по технологии доменной плавки с выходом шлака 210 - 230 кг/т чугуна удалось достигнуть при повышении качества кокса по показателям M10 до 7,4 % и CSR до 55 % и обеспечить выплавку передельного чугуна на ДП №5 в количествах близких к наилучшим показателям (13200 – 13800 т/сутки).

Освоение работы доменных печей с низким выходом конечного доменного шлака, а также внедрение комплекса новых технологических приемов и мероприятий в коксоаглодоменном производстве ПАО «Северсталь» позволило в

2015г. на четырех доменных печах выплавить за год более 9,2 млн. т передельного чугуна и снизить содержание [Si] в чугуне на 0,03%.

В ходе освоения технологии доменной плавки с использованием в шихте низкокремнистых окатышей и кокса различного качества разработан и внедрен способ малошлаковой доменной плавки на магнезиальных шлаках, обеспечивающий заданное качество чугуна в переменных шихтовых условиях [94].

2.3 Изменение показателей качества чугуна в условиях малошлаковой плавки

Поиск закономерностей влияния количества шлака на процессы распределения серы между чугуном и шлаком, а также науглераживания чугуна проводили на базе опытной плавки на магнезиальных шлаках для условий ДП №5. Анализ продуктов плавки в условиях работы доменных печей с низким выходом шлака показывает, что при уменьшении выхода шлака с 300 до 220 кг/т чугуна коэффициент распределения серы между чугуном и шлаком (L_s) снижается с 48 ед. до 24 ед., причем при работе доменных печей с выходом шлака менее 240 кг/т чугуна коэффициент L_s не превышает 32 ед. На рисунках 2.5, 2.6 и в таблице 2.5 представлены результаты исследования влияния состава и выхода шлака на коэффициент распределения серы между чугуном и шлаком для доменных печей ПАО «Северсталь».

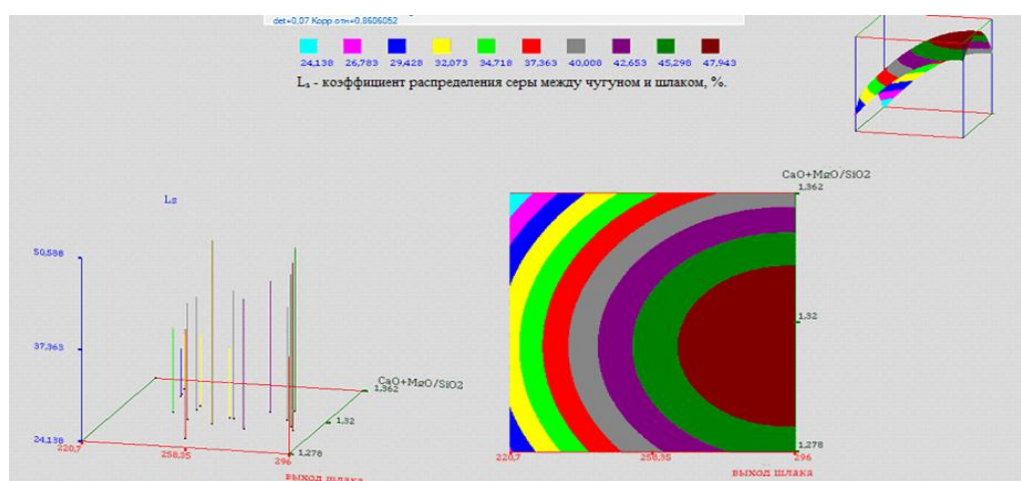


Рисунок 2.5 – Изменение коэффициента распределения серы между чугуном и шлаком в зависимости от выхода шлака и его основности

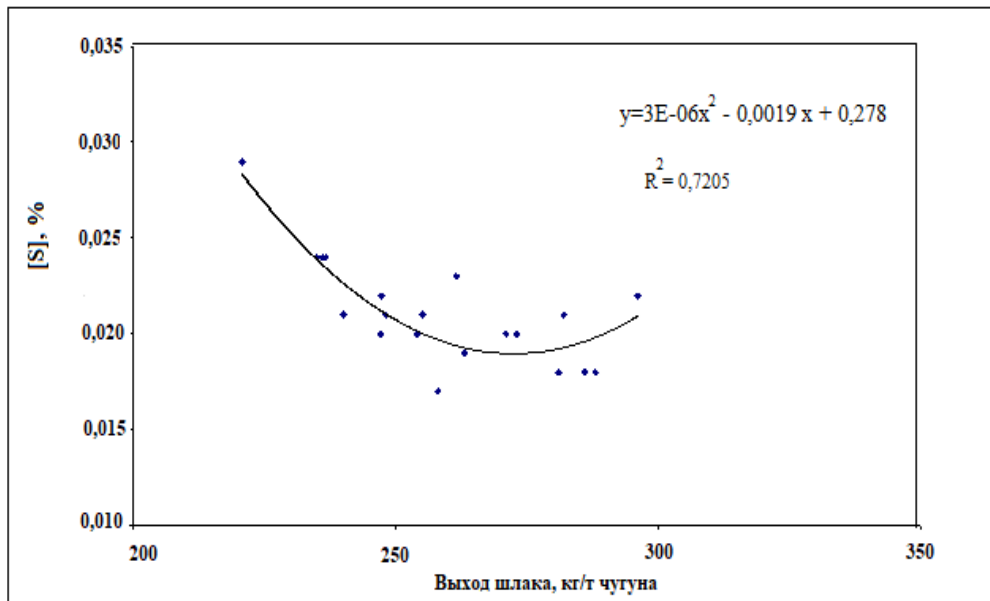


Рисунок 2.6 – Взаимосвязь между выходом шлака и содержанием серы в чугуне

Таким образом, в условиях малошлаковой плавки (< 250 кг/т) при основности шлака $(\text{CaO} + \text{MgO})/\text{SiO}_2 = 1,28 - 1,32$ ед. для доменных печей ПАО «Северсталь» сокращение выхода шлака на каждые 10 кг/т чугуна сопровождалось увеличением содержания серы в чугуне на 0,003%.

Процессы растворения углерода в чугуне в литературных источниках отражены фрагментарно [52, 95], без четкого анализа и уточнения зависимостей влияния различных факторов, за исключением состава чугуна. В отличие от процессов растворения серы, науглероживание чугуна фундаментально не исследовалось, хотя знание процессов растворения углерода и формирование конечного его содержания в чугуне важно для определения как теплового состояния доменной печи, так и качества кокса, приходящего в металлоприемник.

Химическое растворение углерода в чугуне возможно при существовании разницы между равновесной концентрацией насыщения чугуна углеродом $[\text{C}]_{\text{насыщ.}}$ и фактического его содержания в расплаве - $[\text{C}]_{\text{ф.}}$. Причем эта разность равновесной и фактической концентраций может широко изменяться в различных зонах доменной печи во времени при колебаниях температуры чугуна, которая зависит

от теплового состояния горна. Отношение $S_f/C_{\text{насыщ}}$ характеризует степень насыщения чугуна углеродом.

По данным исследования авторов [96] наибольшая факторная нагрузка на значение концентрации насыщения чугуна углеродом принадлежит температуре расплава и содержанию в нем кремния, причем влияние вышеуказанных факторов прямо противоположно: увеличение температуры чугуна приводит к увеличению равновесной концентрации углерода в чугуне, а увеличение содержания кремния, наоборот, уменьшает. Это очевидно отображается в формуле расчета $[C]_{\text{насыщ.}}$, по данным австрийской фирмы «VOEST-ALPINE Industrieanlagenbau», вычисления по которой дают одно из минимальных средних значений относительной погрешности равное 0,116% [97]:

$$[C]_{\text{насыщ.}} = 1,34 + 0,0025 \cdot t_{\text{ч}} - 0,34 \cdot \text{Si};$$

где $t_{\text{ч}}$ – температура чугуна, $^{\circ}\text{C}$,

Фактическое содержание углерода в чугуне, хотя и непосредственно связано с насыщенной концентрацией углерода, существенно зависит прежде всего, от параметров доменной плавки и качества кокса [98]. Исследованиями австралийских ученых показано, что при замусоренном и менее проницаемом слое кокса время и поверхность контакта чугуна с коксом в горне увеличивается, что усиливает растворение углерода в чугуне [99].

Экспериментальные данные показывают, что уровень содержания углерода в чугуне, главным образом, определяется тепловым состоянием процесса плавки (в первую очередь металлоприемника) и в значительной мере определяется качеством кокса, поступившего в заплечики и металлоприемник. Это говорит о том, что содержание углерода в чугуне может быть использовано для контроля теплового состояния низа печи и служить показателем дренажного состояния горна.

Поиск закономерностей влияния количества шлака на процессы науглераживания чугуна проводили на базе опытной плавки с составом железорудной шихты, обеспечивающей магнезиальные шлаки в условиях работы ДП № 5. Характер изменения степени насыщения чугуна углеродом $S_f/C_{\text{насыщ}}$ в

зависимости от выхода шлака, его основности и температуры чугуна (на основании данных таблиц 2.2, 2.3) представлен на рисунках 2.7 и 2.8.

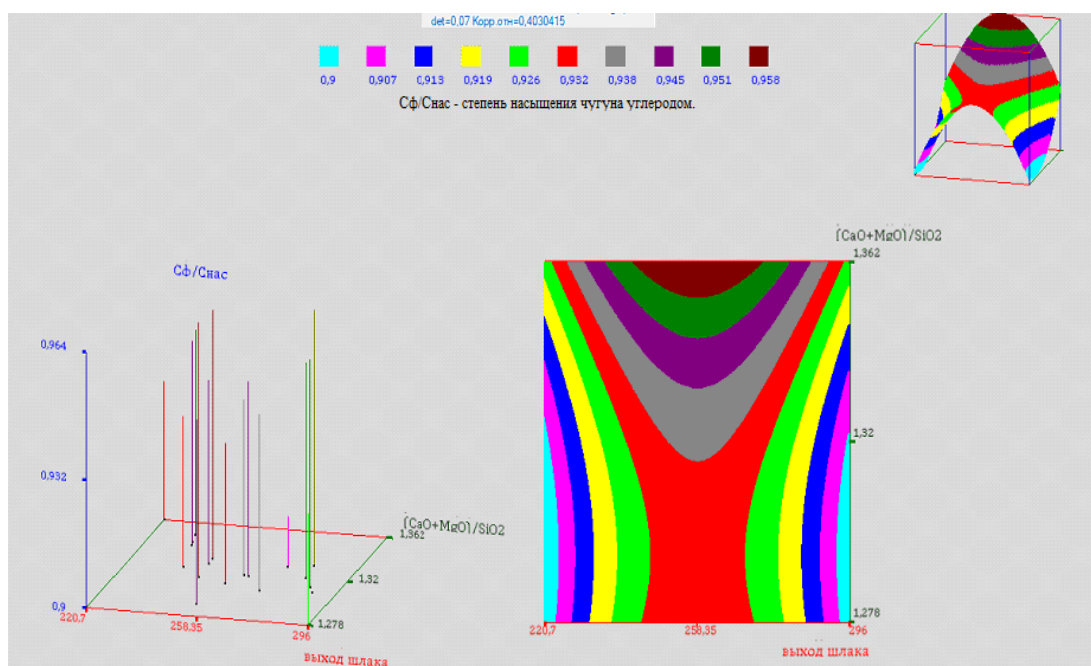


Рисунок 2.7 – Изменение степени насыщения чугуна углеродом ($C_f/C_{\text{насыщ}}$) в зависимости от выхода шлака и его основности

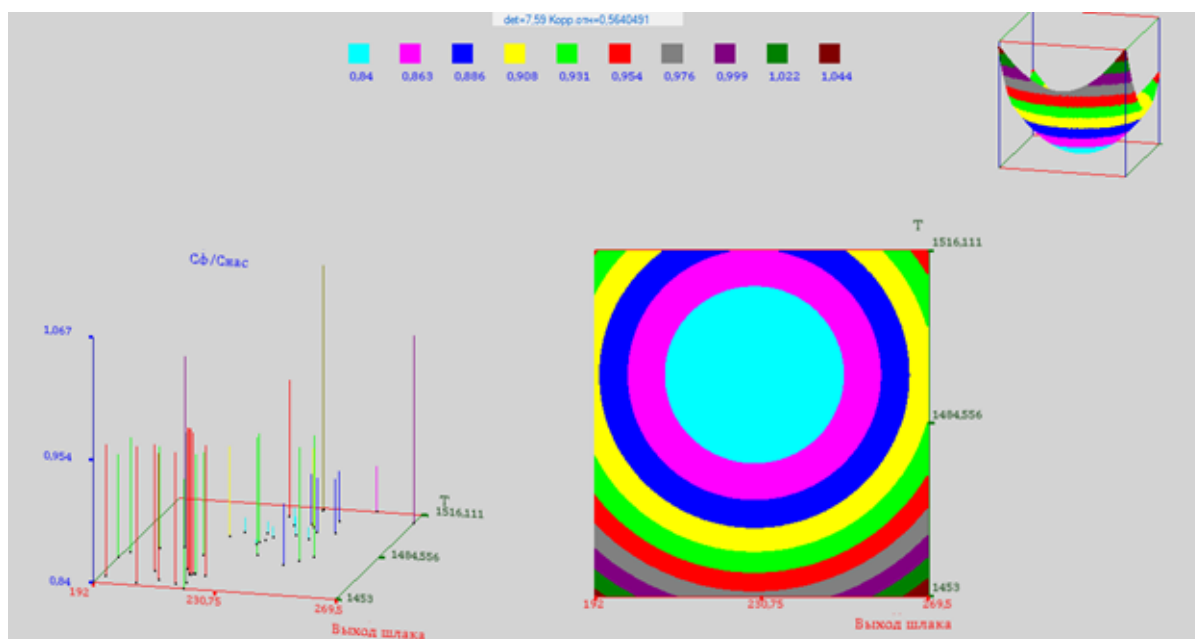


Рисунок 2.8 – Зависимости степени насыщения чугуна углеродом ($C_f/C_{\text{насыщ}}$) от выхода шлака и температуры чугуна

Таким образом, увеличением степени насыщения чугуна углеродом можно управлять с помощью повышения суммарной основности шлака и снижением температуры чугуна (рисунки 2.7, 2.8). Взаимосвязь степени насыщения чугуна углеродом с массовым выходом шлака в данных исследованиях не выявлена.

2.4 Исследование влияния технологических параметров плавки на содержание углерода в чугуне

На доменных печах ПАО «Северсталь» с 2013 г осуществляется постоянный контроль содержания углерода в чугуне [C] в каждом выпуске. Для оценки взаимосвязи [C] с химическим составом и свойствами продуктов плавки был выбран недельный период и выполнен корреляционный анализ выборки значений этих параметров. Наиболее значимые результаты анализа для условий ДП №5, в том числе по леткам, приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Коэффициенты корреляции содержания [C] в чугуне с содержанием химических компонентов в продуктах плавки

Показатель	Коэффициент корреляции				
	Летка 1	Летка 2	Летка 3	Летка 4	ДП
$S_{\text{чуг}}$	- 0,39	- 0,54	- 0,55	- 0,48	- 0,47
$Si_{\text{чуг}}$	0,18	0,54	0,34	0,39	0,31
$S_{\text{шл}}$	0,27	0,42	0,40	0,40	0,35
$Ti_{\text{чуг}}$	0,36	0,56	0,56	0,56	0,48
$MnO_{\text{шл}}$	- 0,29	- 0,42	- 0,40	- 0,40	- 0,35
$T_{\text{чуг}}$	0,25	0,34	0,39	0,38	0,31
$MnO_{\text{шл}} / Mn_{\text{чуг}}$	- 0,23	- 0,31	- 0,40	- 0,31	- 0,30
$TiO_{2\text{шл}} / Ti_{\text{чуг}}$	- 0,27	- 0,42	- 0,32	- 0,41	- 0,30
Al_2O_3 / MgO	- 0,08	- 0,1	- 0,17	- 0,17	- 0,13

На рисунках 2.9-2.10 приведены графики зависимости содержания углерода в чугуне [C] от содержания кремния [Si] и титана [Ti] за период 02.01 - 09.01.2018г. для ДП №5.

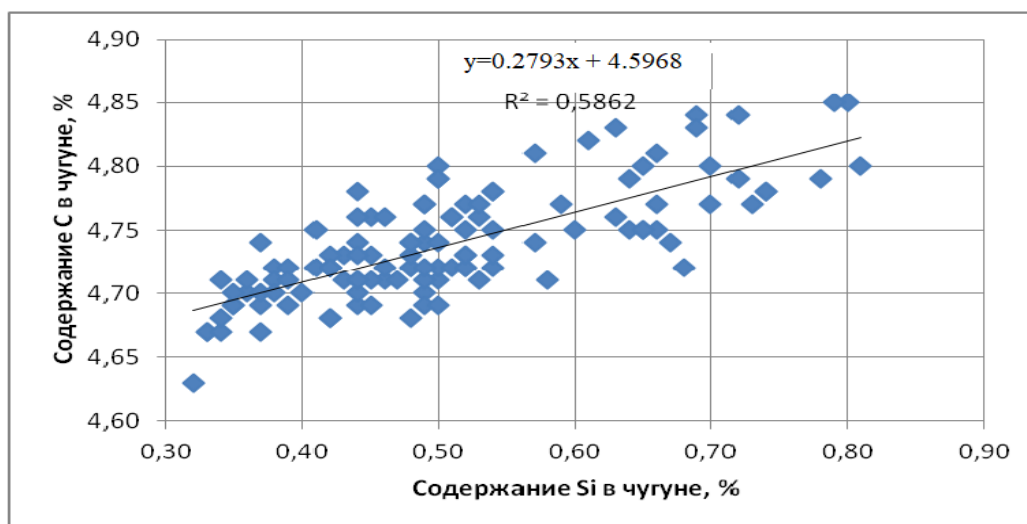


Рисунок 2.9 – Зависимость содержания [С] ДП №5 в чугуна от содержания [Si] за период 02.01 – 09.01.2018 г. (в целом по печи).

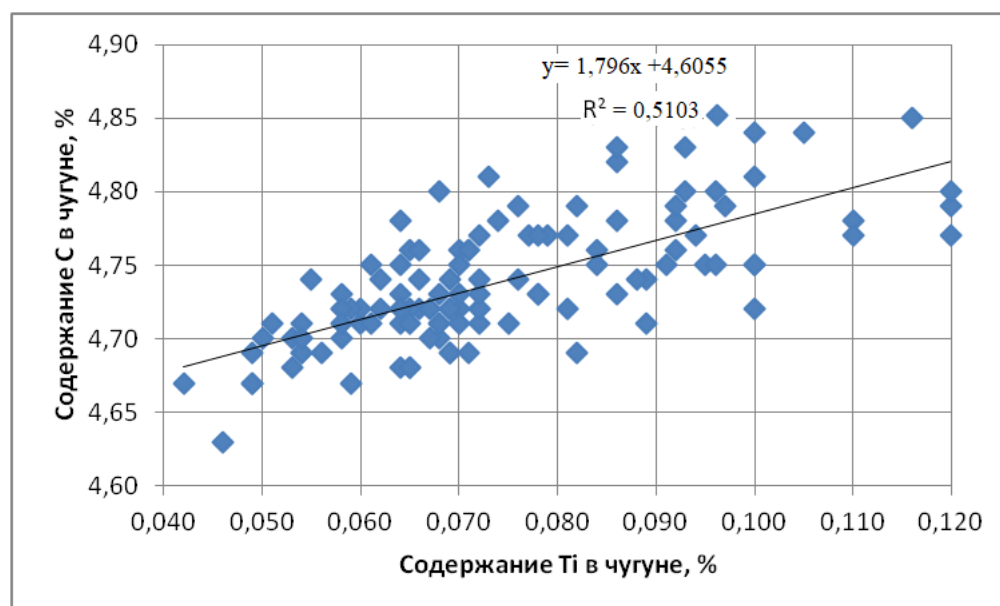


Рисунок 2.10 – Зависимость содержания [С] в чугуна ДП №5 от содержания [Ti] в чугуна за период 02.01 – 09.01.2018 г. (в целом по печи)

При обработке выборки данных исходные значения были нормированы по формуле (2.4) :

$$\tilde{X} = \frac{X - \min(X)}{\max(X) - \min(X)}, \quad (2.4)$$

где: X – нормированное значение параметра (от 0 до 1);

$\max(X)$ – максимальное значение параметра в выборке;

$\min(X)$ – минимальное значение параметра в выборке.

С использованием методов регрессионного анализа были найдены коэффициенты уравнения 2.5 для расчета нормированных значений содержания углерода в чугунах по отобранным параметрам.

$$[C]_p = 4,648 - 0,435 [S^{\wedge}] + 0,395 [Ti^{\wedge}] + 0,072 T^{\wedge}_{\text{чуг}} - 0,229 (MnO^{\wedge}) - 0,225 [Si^{\wedge}] + 0,95 (S^{\wedge}), \quad (2.5)$$

где $[C]_p$ – расчетное значение содержания углерода в чугунах, %;

$[S^{\wedge}]$ – нормированное значение содержания серы в чугунах;

$[Ti^{\wedge}]$ – нормированное значение содержания титана в чугунах;

$T^{\wedge}_{\text{чуг}}$ – нормированное значение температуры чугуна;

$(MnO^{\wedge})$ – нормированное значение содержания MnO в шлаке;

$[Si^{\wedge}]$ – нормированное значение содержания кремния в чугунах;

$(S^{\wedge})$ – нормированное значение содержания серы в шлаке.

После оценки значимости параметров и исключения малозначимых (т.е. тех, которые в наименьшей степени снижают коэффициент корреляции) получено выражение (2.6):

$$[C]_p = 4,313 - 3,453 [S] + 1,480 [Ti] + 2,64 \cdot 10^{-4} T_{\text{чуг}} - 0,049 (MnO) - 0,087 [Si] + 0,081 (S), \quad (2.6)$$

где $[C]_p$ – расчетное значение содержания углерода в чугунах;

$[S]$ – содержание серы в чугунах, %;

$[Ti]$ – содержание титана в чугунах, %;

$T_{\text{чуг}}$ – температура чугуна, °C;

(MnO) – содержание MnO в шлаке, %;

$[Si]$ – содержание кремния в чугунах, %;

(S) – содержание серы в шлаке, %.

Прогнозный расчет содержания углерода с фактическими значениями совпадает на 94,83% для интервала значений в $\pm 3\%$ (отн.), а для коридора значений в $\pm 1\%$ (отн.) – 49,68%.

Коэффициент корреляции расчетного и измеренного содержания углерода в чугунах за весь анализируемый период составил 0,56 (рисунок 2.11).

Сопоставительный анализ фактических и расчетных данных (рисунок 2.12) показал, что полученную расчетную регрессионную модель содержания углерода в чугуна [C] можно использовать в прогнозных расчетах при заданном распределении элементов между чугуном и шлаком в условиях перехода технологии доменной плавки на выплавку низкокремнистого чугуна.

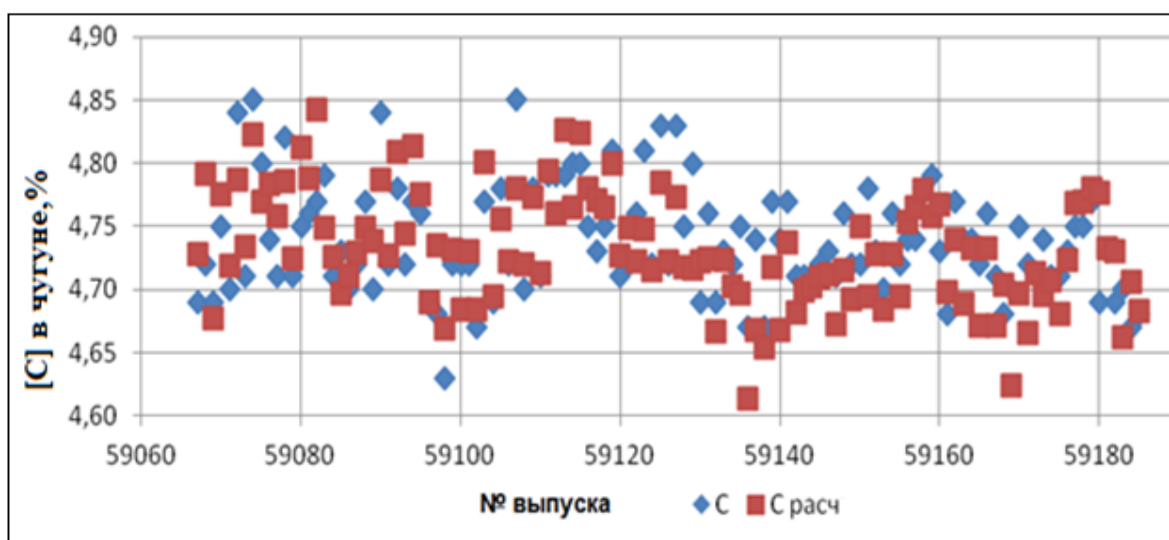


Рисунок 2.11 – Значения измеренного и расчетного содержания углерода в чугуна в период с 02.01.2018 г по 09.01.2018 г

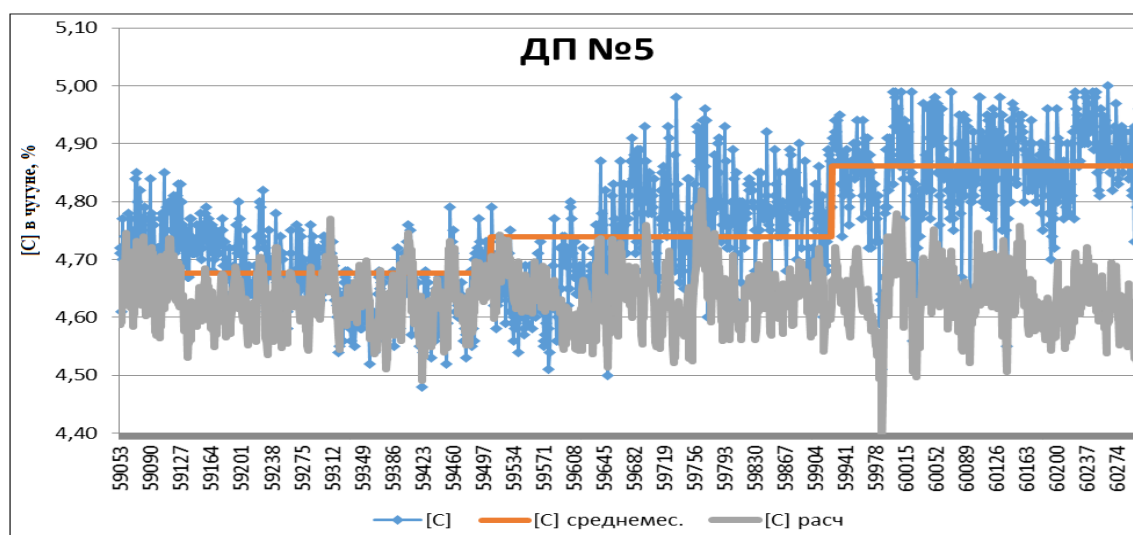


Рисунок 2.12 – Изменение фактического и расчетного содержания [C] в чугуна ДП №5 при увеличении расхода природного газа с 112 м³/т чугуна до 116 м³/т чугуна (январь – март 2018 г.)

Вместе с тем, результаты, приведенные на рисунке 2.12, показывают, что практическое использование зависимости потребует гибкой адаптации численных коэффициентов уравнения при существенных изменениях параметров технологии плавки, например при повышении расхода природного газа.

Для расширенной оценки наличия взаимосвязей содержания углерода в чугунах ДП №5 в промышленных условиях с фактическими характеристиками шихты и продуктов плавки, а также с параметрами процесса плавки по показаниям различных систем контроля выполнен регрессионный анализ выборки соответствующих характеристик и параметров за годовой период. Для анализа использовались часовые средневзвешенные значения всех параметров. Параметры, которые имеют коэффициент корреляции с содержанием углерода в чугунах близких к 0,3 и выше, и значения коэффициентов взаимной корреляции этих параметров приведены в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Корреляционная таблица технологических параметров ДП №5 за годовой период

Параметр	[C]	Вл. ХД	Тчуг	[S]	[Si]	[Ti]	[Mn]	(CaO)	(TiO ₂)	(MnO)	(K ₂ O)	CaO/SiO ₂
[C]	1,000											
Вл. ХД	0,284	1,000										
Тчуг	0,511	0,392	1,000									
[S]	-0,630	-0,363	-0,586	1,000								
[Si]	0,594	0,377	0,458	-0,676	1,000							
[Ti]	0,505	0,351	0,503	-0,669	0,805	1,000						
[Mn]	0,381	0,271	0,429	-0,613	0,400	0,484	1,000					
(CaO)	0,347	0,215	0,221	-0,402	0,295	0,012	0,116	1,000				
(TiO ₂)	-0,387	-0,246	-0,257	0,445	-0,432	-0,015	-0,165	-0,752	1,000			
(MnO)	-0,435	-0,310	-0,428	0,577	-0,453	-0,436	-0,209	-0,509	0,583	1,000		
(K ₂ O)	-0,348	-0,187	-0,360	0,412	-0,355	-0,332	-0,174	-0,549	0,488	0,677	1,000	
CaO/SiO ₂	0,354	0,294	0,390	-0,511	0,408	0,401	0,290	0,728	-0,535	-0,688	-0,691	1,000

Анализ данных корреляционной таблицы (таблица 2.7) показал, что, несмотря, на наличие связи углерода с рядом параметров, характеризующих продукты плавки, взаимосвязь с характеристиками шихты и дутья выражена

довольно слабо. С некоторыми допущениями можно говорить о связи углерода с основностью шихты и влагой дутья.

Регрессионные выражения для определения содержания углерода в чугуне, полученные на основании обработки выборки значений технологических параметров, дают невысокую степень соответствия расчетных и фактических значений на уровне 73 – 74% с невязкой в диапазоне $\pm 3\%$ (отн.), а с невязкой в диапазоне $\pm 1\%$ - на уровне 28 – 29%.

Следует отметить, что среднеквадратическое отклонение (СКО) содержания углерода в выборке значений было невысоким, что, вероятно, предопределило сложность выявления его взаимосвязей с другими параметрами технологии, поскольку в периодах со стабильными параметрами взаимосвязи, как правило, проявляются слабо и практически не прослеживаются.

Для поиска взаимосвязи содержания углерода в чугуне и технологических параметров работы доменной печи в выборке значений параметров за исследуемый период методом скользящей выборки был выделен период с максимальным СКО содержания углерода в чугуне [C]. На рисунке 2.13 показано изменение величины СКО [C] в 2017 г. при определении этой величины по скользящей выборке значений за один месяц. Результаты, приведенные на рисунке 2.13 показали, что максимальные значения СКО ($\sigma, \%$) содержания углерода в чугуне в исследованном периоде при определении этой величины по скользящей выборке значений за один месяц отмечались в период с конца августа по начало октября.

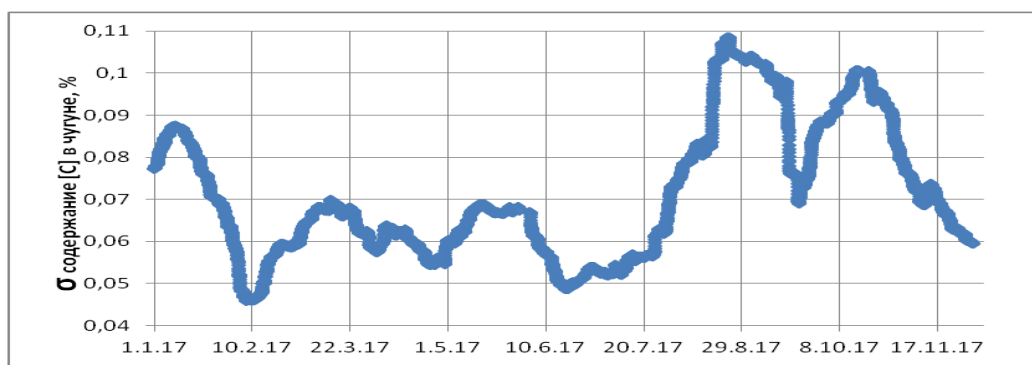
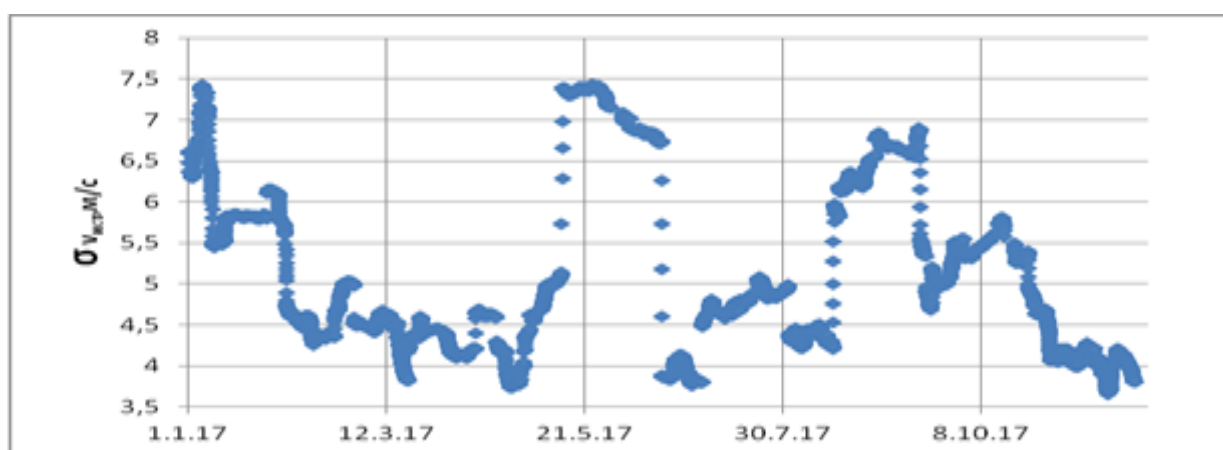
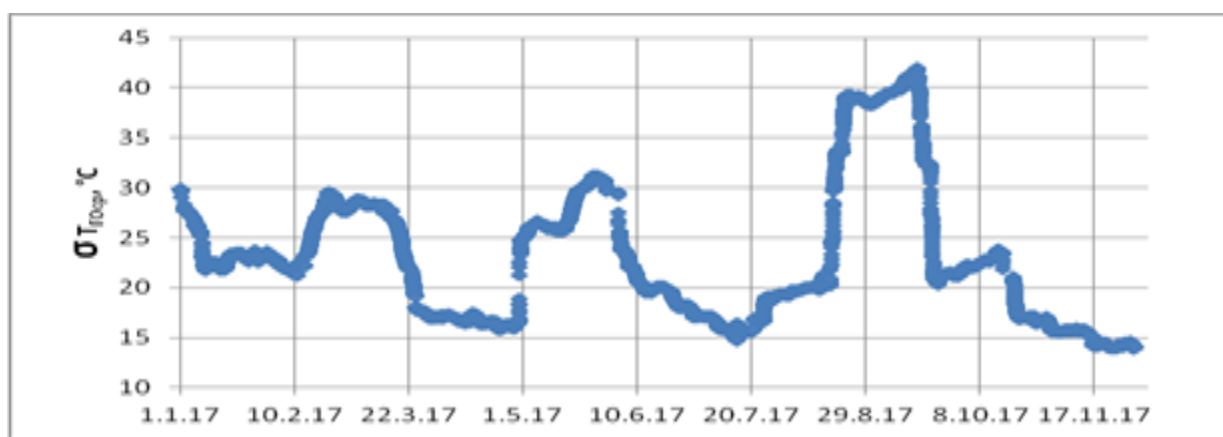
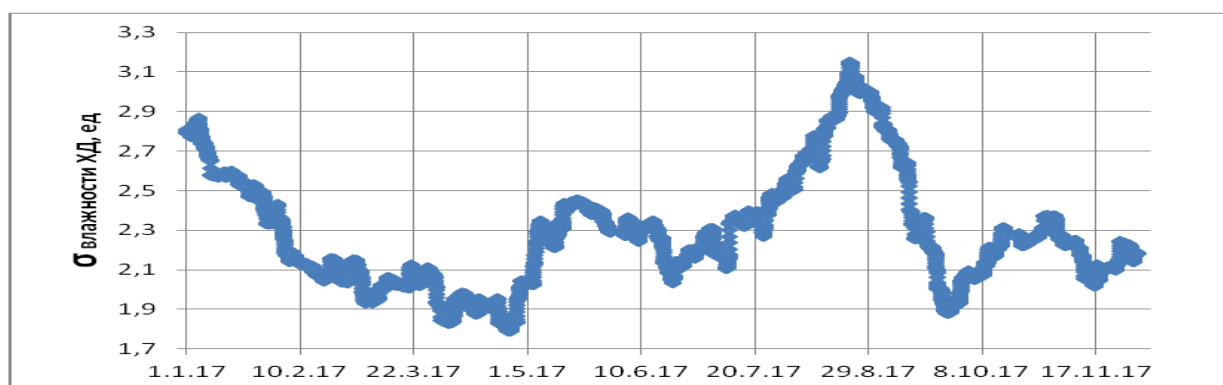


Рисунок 2.13 – Изменение СКО (σ) содержания [C] в чугуне в 2017 г. при определении этой величины по скользящей выборке значений за один месяц

Дополнительно, с целью подтверждения обоснованности использования указанного периода для дальнейшего анализа взаимосвязей параметров и разработки регрессионных зависимостей выполнена оценка изменения СКО 14 технологических параметров, характеризующих шихтовые материалы, продукты плавки и газодинамический режим ДП №5 (рисунок 2.14, таблица 2.6).



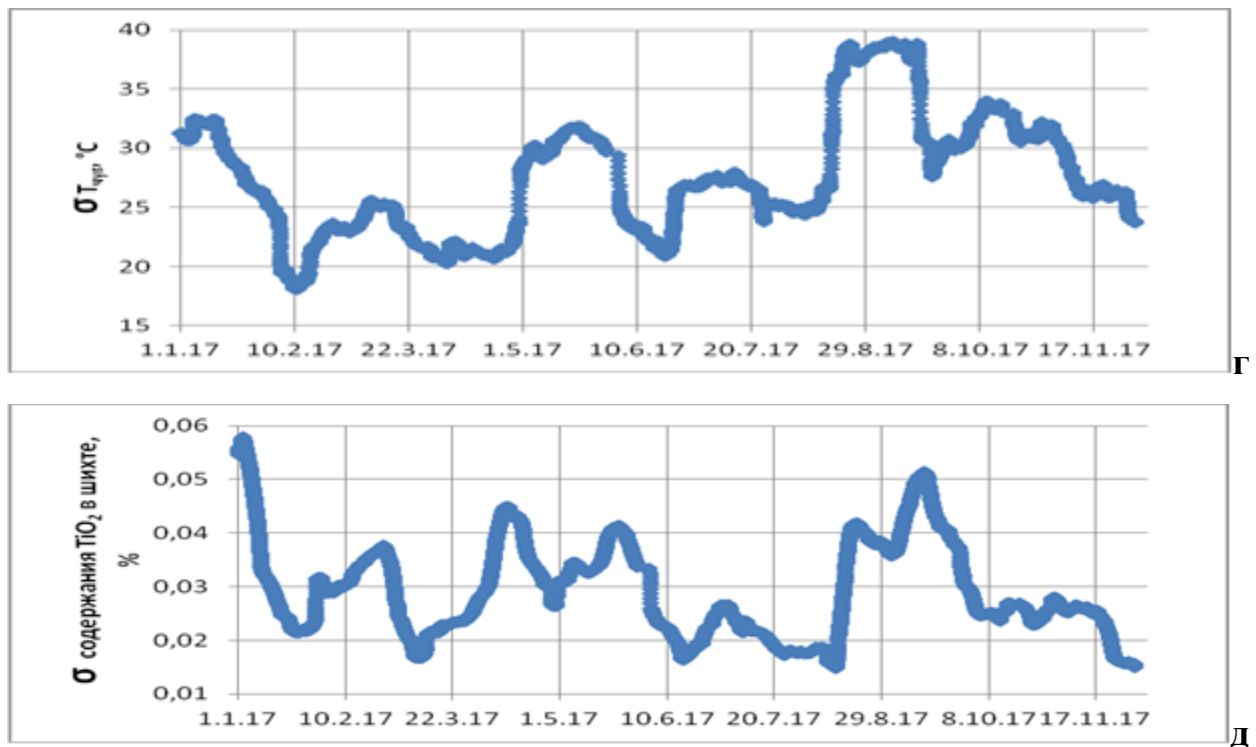


Рисунок 2.14 – Изменение СКО (σ): **а.** влажности холодного дутья, **б.** средней температуры в газоотводах $T_{\text{ГОср}}$, **в.** скорости истечения дутья $V_{\text{ист}}$, **г.** температуры чугуна $T_{\text{чуг}}$, **д.** содержания TiO_2 в шихте в 2017 г. при определении этих величин по скользящей выборке значений за один месяц

Анализ графиков, приведенных на рисунке 2.14 показал, что в период с конца августа до начала октября 2017г. увеличение СКО до максимальных значений было характерно для большинства приведенных параметров. На основании этого для дальнейшего поиска зависимости содержания углерода от характеристик шихты, свойств продуктов плавки и других технологических параметров использовались данные за сентябрь 2017 г.

С целью разработки зависимости для оперативного определения содержания углерода в чугуне были отобраны параметры, которые характеризовались условно сильными и средними корреляционными связями с содержанием углерода (таблица 2.9). Причем, значения параметров, относящихся к процессу загрузки (таких, как расход загруженных шихтовых материалов, рудная нагрузка и химический состав шихты) были взяты за пять часов до рассматриваемого выпуска чугуна.

Таблица 2.9 – Корреляционная таблица технологических параметров и химических составов чугуна, шлака и загружаемых шихтовых материалов (сентябрь 2017 г.)

Параметр	[C]	Тчуг	[S]	(TiO ₂)	(K ₂ O)	(S)	Вл. ХД	TiO ₂	SiO ₂	Руда МихГОК	CRI	Скорость истечения дутья	T _{Госр}	ηCO	[Ti]	[Mn]	(CaO)	(MnO)	Осн
[C]	1,000																		
Тчуг	0,795	1,000																	
[S]	-0,766	-0,768	1,000																
(TiO ₂)	-0,659	-0,620	0,678	1,000															
(K ₂ O)	-0,501	-0,537	0,540	0,716	1,000														
(S)	0,429	0,548	-0,575	-0,738	-0,780	1,000													
Вл. ХД	0,410	0,433	-0,372	-0,455	-0,337	0,334	1,000												
TiO ₂	-0,321	-0,105	0,214	0,428	0,091	0,132	-0,045	1,000											
SiO ₂	0,345	0,154	-0,250	-0,412	-0,104	0,045	0,197	-0,495	1,000										
Руда МихГОК	0,369	0,388	-0,403	-0,406	-0,260	0,485	0,088	0,077	0,289	1,000									
CRI	-0,345	-0,279	0,185	0,119	0,073	0,197	-0,165	0,413	-0,167	0,228	1,000								
Скорость истечения дутья	-0,398	-0,466	0,458	0,281	0,288	-0,152	-0,189	0,220	-0,121	-0,081	0,349	1,000							
T _{Госр}	-0,538	-0,486	0,385	0,233	0,076	-0,002	-0,035	0,304	-0,270	-0,199	0,476	0,372	1,000						
ηCO	0,547	0,579	-0,538	-0,366	-0,162	0,354	0,215	-0,014	0,230	0,517	-0,094	-0,228	-0,656	1,000					
[Ti]	0,529	0,588	-0,701	-0,607	-0,514	0,701	0,445	0,125	0,116	0,501	0,227	-0,154	0,113	0,321	1,000				
[Mn]	0,757	0,710	-0,888	-0,702	-0,501	0,490	0,431	-0,350	0,328	0,372	-0,199	-0,437	-0,351	0,491	0,661	1,000			
(CaO)	0,357	0,336	-0,438	-0,673	-0,665	0,567	0,442	-0,273	0,313	-0,047	-0,215	-0,202	-0,036	0,046	0,350	0,383	1,000		
(MnO)	-0,657	-0,721	0,718	0,782	0,796	-0,847	-0,325	0,056	-0,149	-0,469	0,080	0,365	0,369	-0,522	-0,554	-0,619	-0,521	1,000	
Осн.	0,321	0,405	-0,449	-0,700	-0,731	0,796	0,465	-0,035	0,123	0,182	-0,007	-0,154	0,097	0,125	0,582	0,407	0,857	-0,614	1,000

На начальном этапе была разработана регрессионная модель с полным набором технологических параметров, которые анализировались в процессе поиска. Далее пошагово отбрасывались параметры с наименьшими значимыми коэффициентами и на каждом шаге определялся коэффициент множественной корреляции. Если коэффициент множественной корреляции не изменялся или изменялся незначительно, то параметр признавался малозначимым и исключался, регрессионный анализ выполнялся заново с целью получения новой зависимости. Конечное уравнение (2.7) для расчета содержания углерода в чугуне (C_p) с наименьшими величинами невязки приведена ниже:

$$C_p = 2,5347 + 1,4 \cdot 10^{-3} T_{\text{чуг}} - 2,2241 \cdot [S] - 2,3 \cdot 10^{-3} \cdot (TiO_2) + 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot \varphi - 0,4163 \cdot TiO_2 + 0,0458 \cdot SiO_2, \quad (2.7)$$

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, %.

По формуле (2.7) определялось 97% расчетных значений с погрешностью в диапазоне $\pm 3\%$ (отн.) по отношению к фактическим значениям, а 58,14% - в диапазоне $\pm 1\%$ (отн.). Коэффициент корреляции значений расчетного и фактического содержания углерода в чугуне составил 0,61. Изменение фактического и расчетного (определенного по выражению (2.7)) значений содержания углерода в чугуне показано на рисунке 2.15.

Для приближенных расчетов в условиях изменения дутьевых параметров, в частности, характеристик влажности дутья, предложена регрессионная зависимость (2.8) с минимальным числом значимых параметров:

$$C_p = 2,5681 + 1,3 \cdot 10^{-3} \cdot T_{\text{чуг}} - 2,2646 \cdot [S] + 7,6 \cdot 10^{-4} \cdot \varphi - 0,0331 \cdot (TiO_2) + 0,0575 \cdot SiO_2, \quad (2.8)$$

где

$T_{\text{чуг}}$ – температура чугуна на выпуске, °C;

$[S]$ – содержание серы в чугуне, %;

φ – влажность дутья, г/м³;

TiO_2 – содержание оксида титана в шихте, %;

(TiO_2) – содержание оксида титана в шлаке, %;

SiO_2 – содержание оксида кремния в шихте, %.

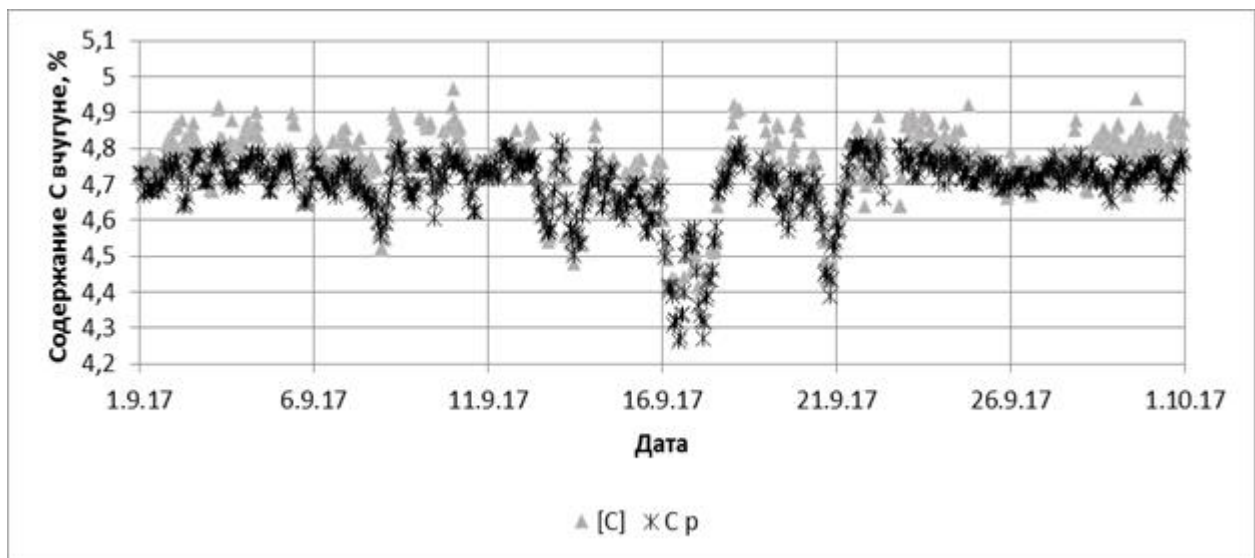


Рисунок 2.15 – Изменение фактического и расчетного (по формуле (2.8)) значений содержания углерода в чугуне (сентябрь 2017 г.)

При использовании формулы (2.8) невязке $\pm 3\%$ (отн.) соответствуют 94,75% результатов расчета, а невязке $\pm 1\%$ (отн.) – 41,59%.

Выводы по разделу 2

1. Сравнительная оценка качества рядовых и низкокремнистых окатышей, выполненная в ходе исследований процессов формирования жидких фаз при проплавке шихты с низким содержанием SiO_2 , показала:

- содержание железа общего в окатышах при равной основности повысилось на 2,6%;

- содержание щелочных элементов в низкокремнистых окатышах 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;
- прочность в исходном состоянии и при низкотемпературном восстановлении в режиме отработки технологии производства окатышей снизилась на 3,7% и 4,2% (отн.), соответственно;
- температурный уровень зоны размягчения, полной потери газопроницаемости железорудного слоя и капельного течения первичных шлаковых расплавов у низкокремнистых окатышей по сравнению с рядовыми повысился на 45 – 50 °С, что привело к увеличению объема сухой зоны доменной печи и повышению восстановимости железорудного сырья;
- содержание FeO в первичном шлаке и масса первичного шлака снизились на 0,5% и 5,8% (абс.), соответственно.

2. Установлено, что увеличение оксида железа в первичном шлаке на 1,0% от массы образца приводит к сокращению содержания углерода в промежуточном металлоуглеродистом расплаве в среднем на 0,15%.

3. Использование в железорудной части доменной шихты 30 – 35 % низкокремнистых окатышей позволило, в среднем, сократить основность агломерата на 0,15 ед., что улучшило подготовку флюса к агломерационному процессу и стабилизировало основность спекаемого агломерата, а также сократило простой оборудования на внеплановые остановки.

4. Уточнены зависимости определения температур размягчения и плавления железосодержащих окатышей с содержанием SiO_2 менее 5 % в условиях работы доменных печей с низким выходом шлака, что позволяет уточнить положение зоны первичного шлакообразования и обосновать управляющее воздействие при необходимости ее изменения посредством корректировки режима загрузки шихты.

5. Впервые в отечественной металлургии на комбинате ОАО «Северсталь» отработана технология малошлаковой магнезиальной доменной плавки с содержанием MgO в шлаке до 14,5%.

6. Впервые установлено, что для условий работы доменных печей с низким выходом шлака (менее 250 кг/т чугуна) снижение его выхода на 10 кг/т чугуна приводит к повышению содержания серы на 0,003%. Эти результаты могут использоваться для выбора рационального шлакового режима для получения чугуна требуемого качества.

7. Выполнены исследования взаимосвязей содержания углерода в чугуне ДП №5 с характеристиками шихты и продуктов плавки, а также с параметрами процесса плавки по показаниям различных систем контроля в промышленных условиях. Анализ изменений технологических параметров в течение 2017 г. показал, что в периоде с максимальным значением СКО содержания углерода в чугуне отмечены максимальные значения СКО параметров, характеризующих шихтовые материалы, продукты плавки и газодинамический режим ДП №5.

8. Разработаны различные варианты регрессионных зависимостей, отражающих взаимосвязи содержания углерода в чугуне ДП №5 с характеристиками шихты и продуктов плавки, а также с параметрами процесса плавки по показаниям различных систем контроля. Зависимость, обеспечивающая наиболее высокую точность расчетного определения 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. Полученные зависимости могут использоваться для оперативной оценки содержания углерода в чугуне и необходимой корректировки технологических параметров с целью обеспечения заданного состава чугуна.

3. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕТРАДИЦИОННЫХ ВИДОВ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

3.1. Экспериментальные исследования свойств фурумнного кокса

Одним из факторов, понижающих себестоимость продукции металлургического производства, является минимизация затрат на сырье, в частности, продуктов коксования. 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. Сырьевой рынок наиболее ценных с точки зрения коксования углей марок К (коксовый), Ж (жирный), КЖ (коксовый жирный), КО (коксовый отощённый), ОС (отощённо-спекающиеся) является дефицитным. В данных условиях особую актуальность имеют технологические решения, дающие возможность, увеличения использования менее ценных, а, следовательно, и более дешевых марок углей.

Как известно, кокс в доменной плавке выполняет следующие технологические функции:

- создание газопроницаемых коксовых “окон” в верхней (“сухой”) части столба шихты;
- обеспечение устойчивой противоточной фильтрации восстановительных газов и жидких продуктов плавки в коксовой насадке в нижней части печи;
- генерирование тепловой энергии в процессе неполного горения углерода кокса;
- генерирование восстановительного газа в реакциях газификации кокса парами воды, диоксидом углерода, оксидами трудно восстанавливаемых элементов (марганца, кремния, фосфора, титана и др.) и монооксида железа.

Технологические функции кокса определяют требования к его качественным показателям: содержанию в коксе свободного (нелетучего) углерода, летучих компонентов, гранулометрическому составу, холодной и горячей прочности, реакционной способности, содержанию вредных элементов и соединений.

Ряд нарушений работы доменных печей, особенно таких, как загромождение горна, горение фурм и связанные с этим негативные последствия, в значительной мере определяют разрушение кокса в высокотемпературной зоне доменной печи. Способность кокса противостоять разрушительным воздействиям температуры, механическим и химическим нагрузкам в процессе плавки определяется его термомеханическими свойствами.

Впервые проведенные в СССР и Японии исследования охлажденных доменных печей позволили изучить изменения структуры кокса в процессе доменной плавки [100, 101]. Было установлено, что кокс для доменной плавки должен характеризоваться узким диапазоном гранулометрического состава, высокой прочностью и низкой истираемостью, а также низкой реакционной способностью. На основании полученных результатов были разработаны методы, позволяющие оценить качество кокса и прогнозировать его поведение в доменной печи на различных уровнях. В верхней части шахты доменной печи основными характеристиками кокса являются показатели холодной прочности $M_{25(40)}$ и M_{10} , которые характеризуют выход фракций +25 мм и -10 мм после вращения в барабане в нормальных условиях [102] и определяют газопроницаемость слоя шихты в доменной печи до зоны вязко-пластичного состояния и «коксовых окон».

На нижних уровнях основными характеристиками являются показатели реакционной способности CRI (Coke Reaction Index) и постреакционной прочности CSR (Coke Strength after Reaction), которые определяют реакционную способность и механическую прочность кокса в вязко-пластичной зоне и ниже зоны плавления, включая горн печи. [103].

В зарубежных странах приняты в качестве основных показателей качества кокса параметры: CSR, $M_{25/40}$, M_{10} и гранулометрический состав, которые в соответствии с требованиями должны составлять: $CSR \geq 60 \%$ ($CRI - 23 - 30 \%$),

$M_{25/40} \geq 80 - 87 \%$, $M_{10} \leq 5 - 7 \%$, содержание фракций $+25 \text{ мм} \geq 94 - 96 \%$, средний размер кусков кокса – $\geq 46 - 50 \text{ мм}$ [104]. В России качество кокса контролируется показателями $M_{25/40}$ и M_{10} , средние значения которых составляют $84,6 \%$ и $8,7 \%$ [105].

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 механических условий плавки.

Целостность вещественной структуры куска кокса обуславливает общность свойств, а также химического состава и предопределяет их проявление в конкретных технологических условиях [106]. Однако, дать точную характеристику термомеханическим свойствам кокса априори (даже при проведении лабораторных исследований с термообработкой в среде CO_2), а также выработать правильные требования к ним сложно из-за того, что вторичные реакции продуктов газификации и их количественные соотношения недостаточно изучены с точки зрения комплексного взаимодействия окислов углерода с коксом и другими шихтовыми материалами. Имеющее место “наложение” первичных и вторичных реакций сильно усложняет анализ динамики газообразования и ее роли в общем процессе плавки. Вместе с тем, термомеханические свойства кокса имеют особое значение в зонах доменной печи с температурой более 800°C , где железорудные материалы теряют свои исходные кондиции. Зондирование доменных печей во время их остановок с отбором проб кокса по радиусу горна от фурмы до центра печи проводилось на ряде доменных печей Европы, Японии и Китая [107]. В ходе проведения исследований изучали гранулометрию кокса, его химический состав, прочность на сжатие и истирание, проводили структурный анализ. Выполненные исследования позволили выявить три различные зоны по радиусу горна, в которых кокс существенно отличается по крупности, химическому составу и прочностным свойствам: зона циркуляции, зона «птичье гнездо» и коксовый «тотерман».

В условиях реальной плавки наиболее точную и достоверную оценку качественного потенциала используемого кокса дает его состояние в фурменной

зоне. Фурменный кокс является продуктом, полученным в результате практически полного комплекса воздействий (за исключением длительного взаимодействия с продуктами плавки), и предоставляет возможность экспериментального изучения различных аспектов проявления отдельных процессов плавки.

Для исследования характеристик фурменного кокса на доменных печах ПАО «Северсталь» при замене фурменных приборов на остановках ДП №5 были отобраны пробы кокса на уровне фурм (рисунок 3.1, 3.2) которые позволили оценить влияние реакционной способности кокса и основных технологических параметров плавки на изменение его гранулометрического состава при движении от колошника до фурменной зоны [108].



Рисунок 3.1 - Пробы фурменного кокса, извлеченного из фурменного прибора доменной печи №5

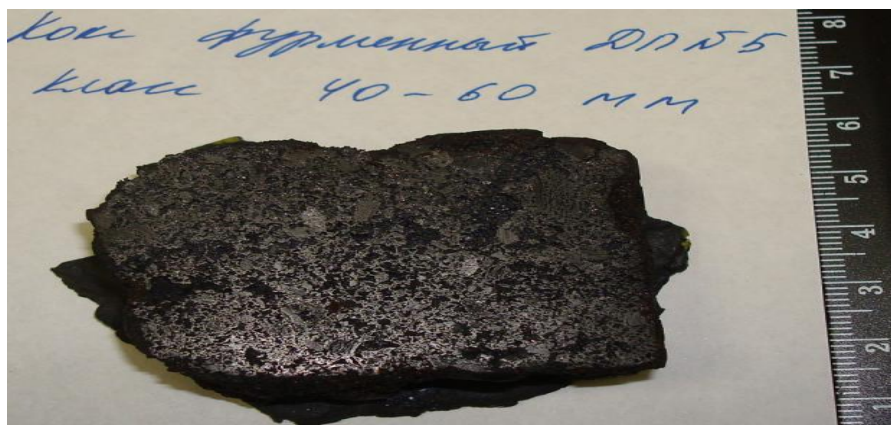


Рисунок 3.2 - Фракция фурменного кокса подготовленная для испытаний

Гранулометрический состав проб скипового и фурменного кокса определялся путем отсева их на ситах с квадратными отверстиями размерами 80 мм, 60 мм, 40 мм, 25 мм и 10 мм для определения классов крупности – менее 10 мм;

10 – 25 мм; 25 – 40 мм; 40 – 60 мм; 60 – 80 мм и более 80 мм. Исследовались характеристики кокса, обеспечивающие выполнение его основных функций в процессе доменной плавки: химический состав (зольность), физико-механические свойства (гранулометрический состав и истираемость), а также показатели CSR и CRI по (ASTM D 5341). Сравнительная характеристика свойств скипового и фурменного кокса, извлеченного из ДП №5 по размерам, показателям прочности после реакции (CSR) и порозности, определенные, как и для доменного кокса по ASTM D 5341, представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Сравнительные характеристики свойств скипового и фурменного кокса, извлеченного из ДП №5

Вид кокса	Средний диаметр, мм	CSR, %	Порозность
Скиповый	62,6	48,0	0,535
Фурменный	26,9	32,4	0,368

Результаты определения ситового состава и технического анализа фурменного кокса представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Технический анализ фракций скипового и фурменного кокса

Класс крупности, мм	Содержание, %	W ^a , %	A ^d , %	V ^{daf} , %	S ^d , %	P, %
Скиповый кокс						
>80,0	8,8	0,20	11,6	0,7	0,50	0,032
60,0–80	55,9	0,19	11,9	0,7	0,53	0,032
40,0–60,0	24,7	0,18	11,6	0,7	0,53	0,030
25,0–40,0	9,5	0,18	11,5	0,7	0,55	0,030
<25,0	1,1	0,16	11,7	0,7	0,58	0,029
Фурменный кокс						
>60,0	0	–	–	–	–	–
40,0–60,0	20,63	0,13	11,6	0,4	0,41	0,022
25,0–40,0	33,41	0,13	12,3	0,1	0,32	0,022
10,0–25,0	39,81	0,12	10,9	0,2	0,41	0,022

Класс крупности, мм	Содержание, %	W ^a , %	A ^d , %	V ^{daf} , %	S ^d , %	P, %
6,3–10,0	3,5	0,11	14,0	0,2	0,30	0,022
0,5–6,3	0,72	0,15	51,9	0,6	0,39	0,020
<0,5	1,93	0,11	38,4	0,5	0,41	0,020

Величина барабанной пробы определялась как остаток по массе на сите «+10мм», которая составила 82,5%. Проба класса «более 10 мм» весом 100 г была помещена в испытательное устройство и подвергнута обработке путем 600 оборотов в течение 30 минут при скорости 20 ± 1 оборотов/минуту по ГОСТ Р 54250-2010.

Характеристики зольности кокса ДП № 5, изменения его состава золы, обусловленные его термохимической обработкой в процессе плавки представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Характеристики зольности кокса ДП № 5

Вид кокса	Зольность, %	Степень озоления, %
Загружаемый скиповый	11,6	0
Фурменный		
Размер фракции, мм:		
40–60	11,6	0
25–40	12,3	6
10–25	10,9	5
6,3–10	14,0	21
0,5–6,3	51,9	35
–0,5	38,4	23

Химический состав золы фурменного и скипового кокса по фракциям и в общей пробе анализировали методом рентгеноструктурного анализа (РСА) на спектрокане «МАКС-GV». Полученные данные представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Химический состав золы фурменного и скипового кокса ДП № 5

Соединение	Фурменный кокс						Скиповый кокс					Отсев кокса	
	Размер фракций												
	–0,5	0,5– 6,3	6,3–10	10–25	25–40	+40	–25	25–40	40–60	60–80	+80	–25	25–40
SiO ₂	29,53	29,98	34,5	47,4	45,1	49,24	52,80	52,62	52,30	52,01	52,73	50,67	48,81
Al ₂ O ₃	15,9	16,3	21,15	22,7	22,81	22,79	24,26	24,12	24,25	23,56	24,33	23,73	23,00
Fe ₂ O ₃	41,6	38,77	27,77	14,88	16,93	14,12	11,84	11,33	12,1	12,73	11,64	14,39	15,84
CaO	4,75	7,27	7,25	4,25	5,74	3,73	3,13	3,5	3,06	3,32	3,26	3,14	3,99
SO ₃	1,16	1,07	0,731	0,524	0,629	0,624	1,58	1,58	1,45	1,37	1,47	1,53	2,00
P ₂ O ₃	0,548	0,31	0,459	0,596	0,512	–	–	0,791	0,789	0,751	–	0,878	0,809
K ₂ O	1,89	1,68	1,77	3,16	2,55	2,87	1,29	1,20	1,30	1,30	1,32	1,10	1,03
TiO ₂	0,868	0,918	1,25	1,36	1,35	1,36	1,33	1,32	1,35	1,29	1,31	1,28	1,21
MgO	1,88	2,08	3,29	2,54	2,47	2,56	1,49	1,63	1,48	1,55	1,55	1,36	1,33
Na ₂ O	0,677	0,595	0,420	1,35	0,699	1,30	0,990	1,00	0,946	0,944	0,908	1,04	0,967
BaO	0,173	0,146	0,253	0,269	0,28	0,280	0,282	0,270	0,267	0,257	0,297	0,272	0,271
SrO	0,126	0,125	0,178	0,211	0,184	0,185	0,153	0,178	0,194	0,165	0,180	0,199	0,181
ZnO	0,201	0,0601	0,0309	0,0153	0,0188	0,0252	0,0096	0,0275	0,0138	0,0226	0,0887	0,0133	0,0453
V ₂ O ₃	0,0607	0,0665	0,0739	0,0636	0,0711	0,0608	0,0574	0,0532	0,0606	0,0575	0,0488	0,0525	0,0453
MnO	0,360	0,383	0,615	0,313	0,372	0,233	0,131	0,112	0,129	0,124	0,12	0,100	0,108
NiO	0,0329	0,0167	0,0251	0,03	0,0285	0,0369	0,0370	0,0354	0,03923	0,0398	0,0379	0,0378	0,0380
CuO	0,0546	0,0295	0,0181	0,0189	0,0202	0,0243	0,0221	0,0213	0,0189	0,0214	0,0174	0,0157	0,0209
Cr ₂ O ₃	0,0522	0,0553	0,0556	0,0704	0,0888	0,0890	0,0562	0,0577	0,049	0,0497	0,0531	0,043	0,0402
CrO ₂	0,0436	0,0491	0,0584	0,0715	0,0680	0,0657	0,0504	0,0571	0,0646	0,0525	0,0504	0,0605	0,0565

Выполненные 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 %. У крупных кусков кокса (+25 мм) реакционная способность повышается на 30 - 36 %, а горячая прочность снижается на 18 - 23 % по отношению к исходному уровню.

Сопоставительный анализ изменения показателей горячей прочности и реакционной способности скипового и фурменного кокса для условий работы доменных печей «Северсталь» представлен в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Показатели горячей прочности и реакционной способности скипового и фурменного кокса для условий работы ДП №№1, 2, 4, 5

Объект	Скиповой кокс		Фурменный кокс	
	CSR	CRI	CSR	CRI
ДП №1, ф* №15	45,2	34,4	22,8	40,8
ДП №2, ф №4	40,5	30,8	22,4	53,8
ДП №4, ф №6	45,4	37,0	22,0	55,7
ДП №5, ф №21	42,1	34,1	33,4	43,5
ДП №5, ф №27	53,5	29,6	28,5	49,3
ДП №5, ф №11	46,8	33,6	10,0	60,2
ДП №5, ф. №7	50,8	34,6	27,2	42,0
ДП №5, ф. №34	50,9	31,6	36,8	39,1

* ф - фурма

Как следует из анализа данных, представленных в таблице 3.5, показатель горячей прочности кокса (CSR) в диапазоне от 40 до 53 % при переходе от скипового к фурменному в среднем снижается на 45 % (отн.), а показатель реакционной способности (CRI) у фурменного кокса увеличивается в среднем на 40,0 % (отн.) по сравнению со скиповым. Этот факт объясняется тем, что в кусках кокса с повышенной реакционной способностью химическая реакция с выделением газов протекает в основном в периферийном слое куска, что приводит к меньшему его разукрупнению в ходе газификации. При малой реакционной способности

кокса реакция газификации протекает в более глубоких слоях и в большем объеме куска, что приводит к его более сильному разрушению.

Связь между реакционной способностью кокса и его прочностными характеристиками, в частности, способности к разукрупнению, исследовали для фурменного и скипового кокса ДП №1 и ДП №2 (см. таблицу 3.6). Данные исследования подтвердили механизм реализации предложенного ранее процесса газификации кокса. Из данных таблицы 3.6 видно, что исследованные составы кокса с высоким показателем реакционной способности (в частности, кокс ДП №1 с CRI = 34,4) в меньшей степени разукрупняются, чем кокс с меньшим показателем CRI (например, кокс ДП №2 с показателем CRI = 30,8).

Таким образом, 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.

Результаты исследований фурменного кокса на доменных печах ПАО «Северсталь» служат основанием для возможности увеличения использования в шихте для коксования доли дешевых углей с повышенным содержанием летучих, имеющих высокую реакционную способность.

Таблица 3.6 – Ситовый состав фурменного и скипового кокса ДП №№1,2

Классы, мм	Скиповой кокс (CRI)	Фурменный кокс	
	ДП №1 (34,4) и ДП №2 (30,8)	ДП №1	ДП №2
> 80,0	7,8		
60,0-80,0	34,4	9,2	0
40,0-60,0	31,0	21,5	7,5
25,0-40,0	23,1	25,0	38,8
10,0-25,0	3,7	31,6	39,3
6,3-10,0	-	5,3	5,6
0,5-6,3	-	7,0	7,1
< 0,5	-	0,4	1,7

3.2. Исследование влияния щелочных элементов на изменение характеристик кокса в рабочем пространстве доменной печи

На реакционные свойства кокса и процессы восстановления железорудных материалов существенное влияние оказывают оксиды щелочных металлов (K_2O и Na_2O). Как показали масштабные исследования качества кокса, проведенные в 60-е годы XX века в ФРГ и Японии на замороженных доменных печах, до уровня распара содержание щелочей в шихте значительно возрастает, а затем начинает снижаться, что отрицательно влияет на механические свойства кокса. Средний размер кусков кокса по направлению к фурменной зоне значительно уменьшается, также снижается его прочность [109, 110].

Щелочи повышают реакционную способность кокса, усиливая газификацию изотропной части углерода кокса и снижая, тем самым, механическую прочность кокса в нижней части доменной печи. В низкотемпературной зоне печи щелочи ускоряют реакцию Будуара или газификации углерода: $C + CO_2 = 2 CO$ и смещают начало реакции в сторону более низких температур. Это приводит к активизации процессов восстановления железорудных материалов, что вызывает изменения как в области формирования расплава, так и в зоне фурменного очага [111].

Исследования образования коксовой мелочи в результате истирания до и после прохождения через печь показали, что образование силиката калия ($K_2O \cdot 2SiO_2$) с температурой плавления $1045^\circ C$ придает коксу пластичные свойства. Образование калиофилита ($K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$), наблюдаемое при температурах от $1000^\circ C$ до $1200^\circ C$ в присутствии CO , сопровождается значительным увеличением объема (до 40%), в результате чего кокс измельчается. Происходит также внедрение атомов калия в кристаллическую решетку углерода, создающее напряжение, которое, вследствие хрупкости кокса, может быть снято только за счет появления и распространения трещин.

Изучение влияния щелочных металлов на прочностные характеристики кокса показало [112], что данные металлы, в частности калий, являются катализаторами реакции газификации. Экспериментальными исследованиями установлено, что

увеличение содержания калия в коксе от 0,3 - 0,4% до 1,5 - 4,3% снижает температурный порог начала газификации на 20 – 250 °С (в зависимости от природы угольной шихты, использованной для получения кокса).

Исследование влияние щелочей на свойства кокса показало, что присутствие калия и натрия в коксе увеличивают его реакционную способность (CRI) и истирание, снижают высокотемпературные прочностные характеристики (CSR) [113]. При высоких температурах щелочи проникают в углеродную матрицу и снижают прочность кокса. Так, при 1200 °С содержание калия в изотропной и мозаичной текстурах углерода увеличивалось с 0,07 % до 0,7 % и 0,25 %, соответственно. Исследования также показали уменьшение прочности кокса на сжатие при температуре 1500 °С в присутствии паров калия с 26 до 17 МН/м², которое происходит прямо пропорционально концентрации этих паров.

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 доменной печи №4 на глубине 10-12 м от уровня засыпи шихты. Выполнен технический анализ, определен химический состав золы кокса, его реакционная способность и горячая прочность, проведена оценка изменения химического состава золы кокса от поверхности куска к центру путем проведения химического анализа каждого слоя, полученного при обработке коксового куска в барабане. В таблицах 3.7 и 3.8, а также на рисунках 3.3 и 3.4 приведены результаты контроля качественных характеристик кокса.

Таблица 3.7 – Технический анализ и показатели качества скипового кокса и кокса, извлеченного с отметки 25705 мм из ДП №4

Наименование материала	Данные технического анализа			CRI, %	CSR, %
	A ^d , %	V ^a , %	S ^d , %		
Кокс скиповый	11,9	0,8	0,54	36,1	46
Кокс с отметки 25705 мм	13,3	0,6	0,56	39,3	44,15
Фурменный кокс	22,7	0,4	0,39	55,7	22,0

Таблица 3.8 – Химический состав золы кокса, извлеченного из ДП №4

Наименование	Масса пробы кокса с поверхности / общая масса пробы, %	Химический состав, %						
		Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	CaO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O
Зола скипового кокса	-	7,27	55,2	1,83	3,3	25,3	1,17	1,31
Зола кокса с отметки 25705 мм	-	13,41	51,55	2,12	4,4	22,03	1,09	2,51
Зола фурменного кокса	-	7,56	32,05	3,57	11,43	15,3	2,59	1,85
Зола кокса с отметки 25705 мм	6,0	35,49	28,99	2,68	6,87	10,94	0,85	3,57
	13,0	36,38	26,32	2,71	7,06	11,19	0,94	3,68
	20,5	18,4	45,31	2,13	5,2	20,17	1,12	2,17
	28,5	13,96	48,57	1,99	4,69	22,27	1,13	1,79
	32,2	11,78	50,99	1,99	4,29	23,51	1,13	1,55
Зола кокса с отметки 25705 мм	37,5	10,58	51,45	1,91	4,25	23,87	1,14	1,52
	47,5	10,15	52,23	1,88	4,1	24,35	1,16	1,52
	57,5	10,03	52,22	1,88	3,88	24,17	1,15	1,43

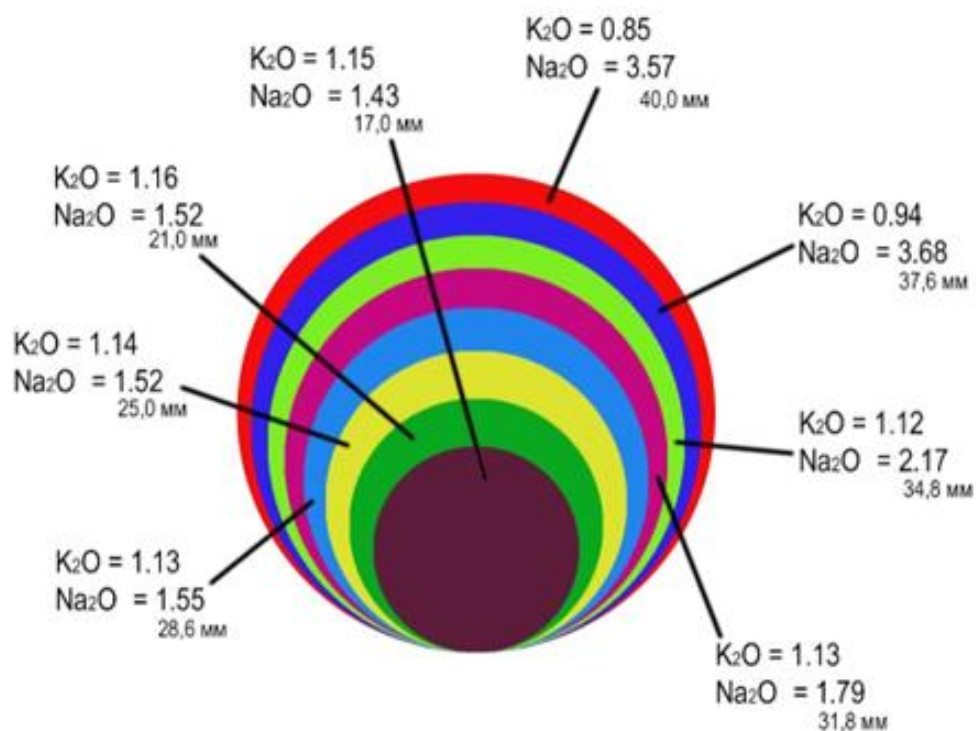
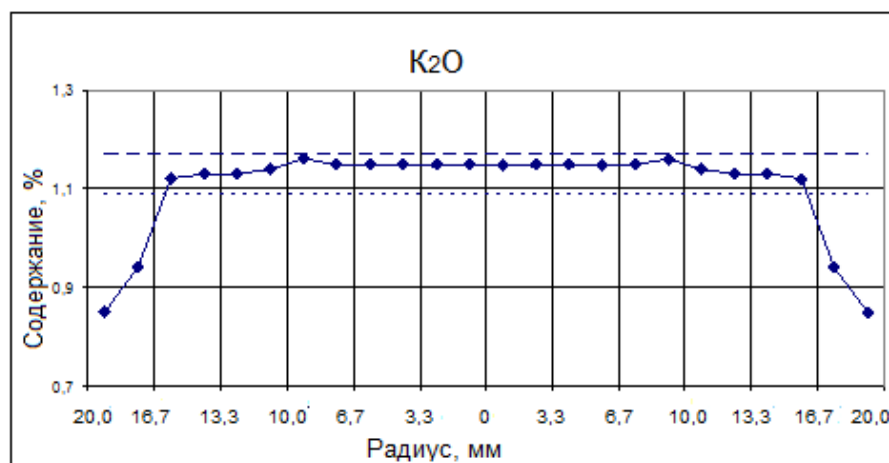
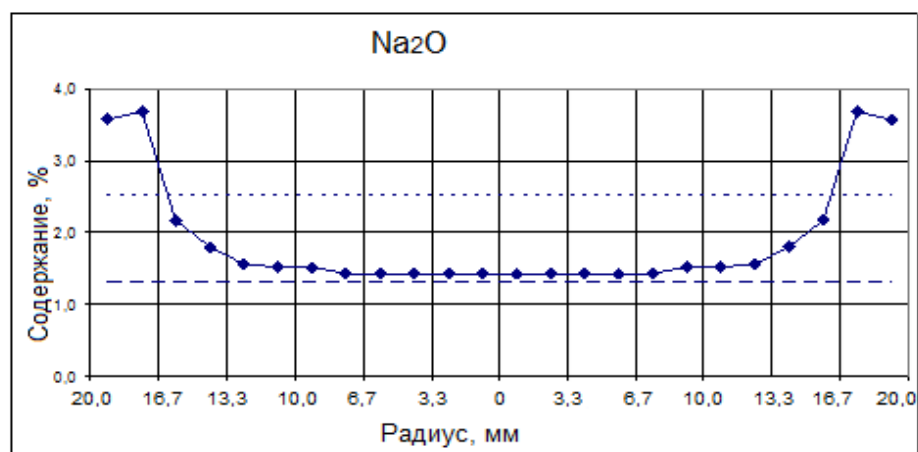


Рисунок 3.3 - Диаграмма распределения щелочей в структуре кокса, отобранного с отметки 25705 мм



А



Б

— — — - зола исходного кокса (средневзвешенное значение);
 зола кокса с отметки 25705 мм (средневзвешенное значение)

Рисунок 3.4 – Характер изменения содержания соединений А. калия и Б. натрия в золе кокса по всему объему куска, отобранного с отметки 25705 мм

По результатам контроля характеристик кокса, извлеченного с отметки 25705 мм шахты ДП №4 и фурменного очага, было обнаружено, что по сравнению со скиповым коксом (табл.3.7) их реакционная способность повышается на 9% - 54% (отн.), а горячая прочность снижается на 4% - 52% (отн.), соответственно. Основными факторами, определяющими изменение реакционной способности кокса, являются: взаимодействие массы кокса с CO ; насыщение тела кокса щелочными элементами; насыщение тела кокса железорудной пылью.

Исследования показали, что при опускании шихтовых материалов на 10–12 м от уровня засыпи ионы калия наиболее активно пронизывают треть куска кокса, хотя увеличение содержания калия в золе кокса отмечается по всему объему куска. Ионы натрия в коксе в основном сосредоточены в поверхностном слое.

Таким образом, впервые показано, что ионы натрия и калия при прохождении кокса в доменной печи до отметки 25705 мм внедряются в тело кокса по-разному, что, может быть, связано с большей каталитической активностью калия в реакции Будуара, протекающей на поверхности кокса, по сравнению с натрием, согласно [114], а также различной способностью этих металлов к образованию слоистых соединений с графитом [115]. Как известно [116], наиболее легко образуется интеркаляционное соединение калий-графит, где все углеродные слои разделены слоем калия. Различия в поведении щелочных металлов по отношению к графиту объясняются тем, что восстановительный потенциал Na меньше, чем у K, который благодаря этому образует с графитовыми пластинами кокса соединения включения C_8K , $C_{24}K \dots C_xK$, чем, по всей видимости, объясняется его распределение по всему объему куска кокса. Несмотря на неустойчивость интеркаляционных соединений калий-графит при высоких температурах, авторы [117] обнаруживают подобные структуры в коксах, искусственно обогащенных калием и прокаленных при 1260°C в атмосфере аргона. Это подтверждает возможность образования соединений включения калия в куске кокса, приводящих к тому, что в золе фурменного кокса калия остается больше, чем натрия (см. табл. 3.8).

Данные по распределению щелочей в образцах кокса с отметки 25705 мм могут свидетельствовать также о том, что реакция газификации углерода кокса, которая начинается с поверхности куска при катализе ионами калия быстрее распространяется в глубину пор, что приводит к их расширению и более быстрой диффузии ионов калия в глубь кокса. Это приводит к тому, что ионы калия рассредотачиваются по всему объему кокса, в то время как ионы натрия остаются сосредоточенными на поверхности. Эти факты говорят о том, что подбор шихтовых материалов должен проводиться с учетом не только количества, но и состава щелочной нагрузки. Например, 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, но по мере прихода такого кокса на уровень фурм в доменной печи, его остаточные прочностные характеристики могут полностью удовлетворять условиям плавки.

Ряд авторов отмечают [20, 118], что присутствие Fe в золе кокса, также повышает его реакционную способность и снижает температуру начала процесса газификации кокса под действием CO_2 . Как следствие, это приводит к дополнительным расходам кокса. Повышение реакционной способности кокса в присутствии Fe отрицательно сказывается на его прочностных характеристиках. Это также касается железорудной пыли, которая забивает поры коксового куска. В образцах кокса с отметки 10 - 12 м от уровня засыпи максимальное насыщение железорудной пылью зафиксировано в слое куска кокса глубиной в 1,5 - 3,0 мм (рисунки 3.5 и 3.6).

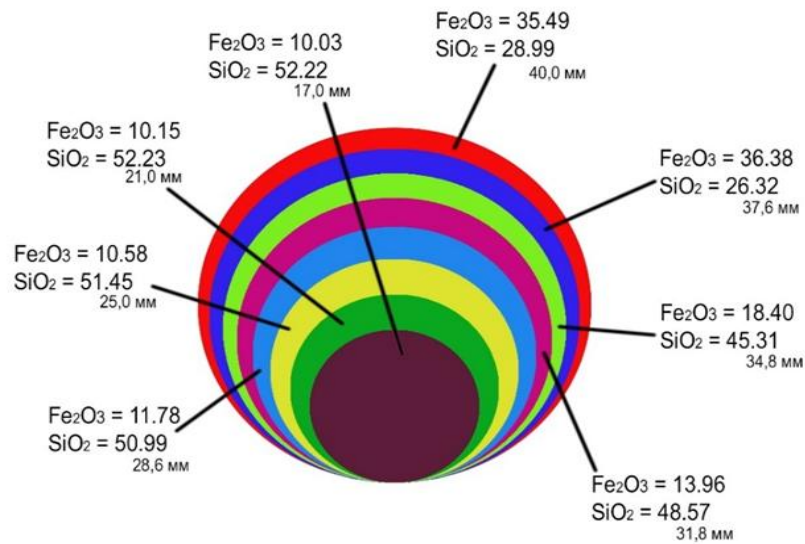
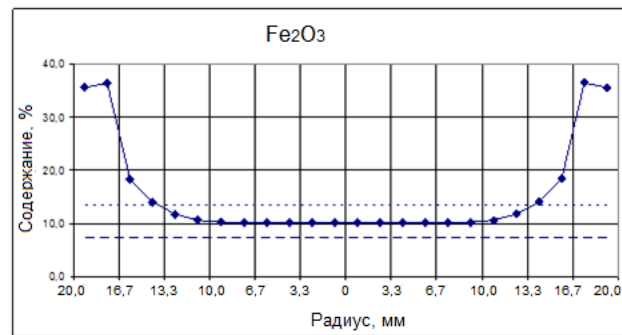
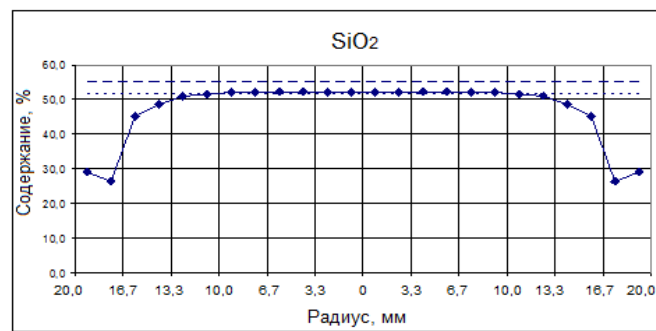


Рисунок 3.5—Диаграмма распределения гематита в структуре кокса с отметки 25705 мм



А



Б

— — — - зола исходного кокса (средневзвешенное значение);

·····- зола кокса с отметки 25705 мм (средневзвешенное значение).

Рисунок 3.6 - Характер изменения содержания А. Fe_2O_3 и Б. SiO_2 в золе кокса по всему объему куска, отобранного с отметки 25705 мм

Согласно адсорбционно-автокаталитической теории, предложенной Чуфаровым Г. И. [119], процессы восстановления происходят не в газовой фазе, а на поверхности и в порах куска твердого вещества. Железородная пыль проникает в поры кокса и, имея большую площадь соприкосновения с поверхностью коксового куска, катализирует реакцию газификации углерода, ускоряя процесс восстановления оксидов железа до железа $Fe_{мет}$. Образовавшееся свежевосстановленное железо является катализатором этого процесса. Автокаталитический характер процесса восстановления проявляется в том, что с ростом числа зародышей новой фазы и увеличением реакционной поверхности скорость реакции резко возрастает. В то же время образующийся наружный слой восстановленного металла или низшего оксида оказывает существенное влияние на скорость диффузии: чем больше толщина данного слоя, тем в большей степени затруднена диффузия в глубь куска. Поэтому содержание оксидов железа максимально на поверхности куска кокса. Прочностные характеристики железорудных материалов (окатышей) влияют на величину железорудной пыли в слое засыпи и определяют содержание оксидов железа на поверхности коксового куска.

Комплексный подход по использованию более дешевых марок угля с повышенным содержанием летучих компонентов должен быть сбалансированным по качественным и количественным показателям всей доменной шихты с учетом сокращения прихода щелочей за счет увеличения доли Fe и уменьшения содержания SiO_2 в железорудной составляющей, что позволит снизить щелочную нагрузку на кокс и уменьшит падение его прочностных характеристик в высокотемпературной зоне печи.

Также нужно учитывать прочностные характеристики железорудных материалов, не допуская критической концентрации железорудной пыли, способной понизить высокотемпературные характеристики твердого топлива.

Таким образом реализация шагов по уменьшению щелочной нагрузки в доменной печи в условиях перехода технологии на выплавку чугуна с низким выходом шлака (приведенные в разделе 2), позволяют снизить требования к

качеству кокса по его высокотемпературным свойствам. Новые знания о поведении щелочей в доменной печи использованы при разработке нового углеродсодержащего продукта ИПУС.

3.3 Разработка технологии производства инновационного продукта углеродсодержащего (ИПУС)

Минимизация затрат на сырье, которое в общей структуре затрат на производство металлопродукции в настоящее время составляют ~65 – 70 %, является одним из основных направлений снижения себестоимости и повышения эффективности доменного производства. Дефицит наиболее ценных с точки зрения коксования углей марок Ж (жирный), К (коксовый), КС (коксовый слабоспекающийся), КО (коксовый отощенный), ОС (отощенный слабоспекающийся) определяет актуальность разработки новых технологических решений, позволяющих увеличить использование менее ценных и более дешевых марок углей.

С целью оценки возможности использования в коксовом цехе ПАО «Северсталь» менее ценных углей были выполнены экспериментальные исследования, в ходе которых в качестве сырья для производства кокса выбраны: угольный концентрат, условно пригодный к коксованию и имеющий наименьшую закупочную стоимость (концентрат №1) и концентрат №2, являющийся технологически ценным. Результаты выполненных исследований явились основанием разработки и реализации в условиях ПАО «Северсталь» нового способа получения инновационного продукта углеродсодержащего (ИПУС) с заданными характеристиками из углей, условно пригодных для коксования (60-100%), в процессе слоевого коксования в коксовых батареях с гравитационной загрузкой [120]. Параметры качества угольного сырья и соотношение концентратов в шихте для ИПУС приведены в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Качественные характеристики угольного сырья для
производства ИПУС

Наименование показателя	Концентрат № 1	Концентрат № 2
Технический анализ угля:		
Массовая доля общей влаги, W^r %	7,6	7,8
Зольность, A^d %	8,0	8,2
Выход летучих веществ на сухое беззольное состояние, V^{daf} %	35,8	26,7
Петрографический анализ:		
Показатель отражения витринита, R_o %	0,797	1,264
Стандартное отклонение показателя отражения, σR , %	0,068	0,078
Содержание витринита, V_t , %	80,2	68,9
Содержание семивитринита, S_v , %	3,6	5,4
Содержание инертинита, I , %	16,1	25,7
Сумма отошающих компонентов, ΣOK %	18,6	27,5
Участие в шихте для коксования, %	80	20

Полученный углеродсодержащий продукт по своим качественным характеристикам отвечает требованиям соответствующих стандартов оценки качества (таблица 3.10).

Таблица 3.10 – Качественные характеристики продукта ИПУС

Наименование показателя	Результат измерения	Обозначения методики выполнения измерения
Зольность, A^d %	11,5	ГОСТ 55661
Выход летучих веществ на сухое беззольное состояние, V^{daf} %	0,9	ГОСТ 55660
Массовая доля углерода, %	82,3	ГОСТ 2408.1
Содержание Фракция, «+25 мм», %	92	ГОСТ 2093
Показатель прочности после реакции с диоксидом углерода, %	37,5	ГОСТ Р 54250

Технологический процесс производства ИПУС включает в себя следующие технологические операции:

- загрузка в коксовые печи подготовленного угольного сырья;
- коксование угольного сырья без доступа воздуха;
- выдача из печи инновационного продукта углеродсодержащего (ИПУС);
- процесс тушения;
- сортировка инновационного продукта углеродсодержащего (ИПУС) и передача его потребителям.

ИПУС получают в процессе слоевого коксования угольной шихты, состоящей из 60 – 100 % углей одной или нескольких марок, условно пригодных для коксования, и 0 – 40 % коксующихся углей. Он характеризуется выходом летучих веществ не более 1,0 %, показателем прочности после реакции с диоксидом углерода не менее 25 % и имеет массовую долю углерода не менее 80%.

Способ получения ИПУСа предусматривает формирование угольной шихты для коксования из одной или нескольких марок малоценных угольных концентратов, условно пригодных к коксованию. Для получения инновационного продукта с заданными качественными характеристиками технологический процесс в коксовых батареях гравитационного типа регламентировали температурой в контрольных вертикалах 1200 – 1400 °С и периодом коксования от 14 до 18 часов. Введение в шихту до 40% коксующихся углей направлено на получение в готовом продукте требуемой прочности после реакции с диоксидом углерода, что обусловлено последующим использованием его в доменном переделе. Как показали эксперименты, при периоде коксования менее 14 часов невозможно достичь требуемого содержания летучих веществ (менее 1%). При периоде коксования более 18 часов наблюдается уменьшение содержания углерода менее 80%, что недопустимо для последующего доменного передела.

Для выполнения тепловой и химической функции в доменном процессе фракция полученного продукта должна быть не менее 25 мм и с регламентированным выходом летучих веществ не более 1%. Фракция менее 25 мм

не может быть использована в доменном процессе, т.к. не обеспечивает достаточной газопроницаемости столба шихты.

Параметры рабочих и специальных режимов загрузки кокса и его заменителей в доменную печь определяются технологическими требованиями к их распределению в рабочем объеме доменной печи. В свою очередь, эти требования непосредственно связаны с характеристиками углеродсодержащих компонентов. Если топливно-восстановительная часть шихты состоит из продуктов высокого качества (например, с показателями $M_{10} < 7,0\%$ и $CSR \geq 55\%$), технологические требования к ее распределению по радиусу колошника при работе доменной печи в штатном режиме и отсутствии задач по изменению температурного режима отдельных зон печи определяется исключительно заданным распределением рудных (или газовых) нагрузок.

Кокс высокого качества используется для организации устойчивого осевого газового потока путем загрузки его преимущественно в центральную зону доменной печи. Требования к коксу, загружаемому в периферийную зону, несколько ниже, однако, для работы этой зоны основное значение имеет постоянство свойств топливно-восстановительных компонентов, что в первую очередь, связано с необходимостью обеспечения стабильности условий образования и поддержания защитного гарнисажа на стенках шахты и на заплечиках. В связи с этим для загрузки периферийной зоны может использоваться кокс с нижней границей горячей прочности на уровне $CSR = 48 - 50 \%$.

Наиболее низкие требования предъявляются к коксу, определяющему тепловые и восстановительные условия промежуточной зоны доменной печи. В зависимости от шихтовых условий конкретной доменной печи допускается снижение требований по горячей прочности до уровня $CSR = 40 - 46\%$ и по холодной прочности до $M_{10} \geq 8,0\%$. Основываясь на этих положениях, новый инновационный углеродсодержащий продукт целесообразно загружать в промежуточную зону печи, что позволит обеспечить заданные требования к его распределению.

3.4 Разработка технологических приемов и мер при выплавке чугуна с использованием ИПУС

Удельный расход ИПУСа на начальной стадии реализации в доменном процессе на ДП №1 ПАО «Северсталь» составлял 50 - 57 кг/т чугуна, на ДП №2 - 48 - 54 кг/т чугуна. Для ДП №4 загрузка этого компонента в каждую подачу позволила довести потребление ИПУСа до уровня 80 кг/т чугуна, а его поэтапное внедрение в составе железорудной части промывочных подач обеспечило увеличение удельного потребления до 95 кг/т чугуна. Последующие стадии использования ИПУС в составе топливно-восстановительных компонентов шихтовых материалов позволили довести его потребление до 100%.

Основные технологические параметры работы ДП №4 в период отработки технологии с использованием ИПУС в качестве основного топливного компонента (четвертый квартал 2020 г.) и параметры твердого топлива представлены в таблице 3.11 и на рисунках 3.7 и 3.8.

Таблица 3.11 – Техничко-экономические показатели работы ДП №4 в 2020 г.

Наименование показателя	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь
Производительность, т/сут.	7113	7244	6938
Расход сырья, кг/т чугуна:			
Руда Яковлевская	21,8	20,6	6,8
Агломерат	934,8	928,2	868,3
Окатыши КостГОК	433,8	-	-
Окатыши магнезиальные	146,6	617,1	624,2
Итого металлошихты	1569,2	1578,1	1596,2
Содержание Fe _{общ} в шихте, %	61,04	60,81	61,04
Поступление R ₂ O, кг/т чугуна	3,06	2,94	2,88
Кокс сухой, в т. ч., кокс фр. 10 – 35, кг/т чугуна	402,9	42,7	42,4
Кокс фр. 10 - 35, кг/т чугуна	21,7	-	-
ИПУС, кг/т чугуна	5,9	358,6	370,8
Антрацит, кг/т чугуна	0	1,6	0
Химический анализ колошникового газа, %:			
CO ₂	22,26	22,21	21,94
CO	23,99	24,38	25,23
H ₂	8,55	8,79	8,67
Степень использования CO, %	48,13	47,67	46,51
Давление колошникового газа, кгс/см ²	2,02	2,03	2,00

Наименование показателя	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь
Температура колошникового газа, °С	107	100	92
Удельный расход природного газа, м ³ /т чугуна	114	116	120
Теоретическая температура горения, °С	2056	2047	2050
Дутье:			
Содержание O ₂ , %	28,20	28,10	28,24
Влажность, г/см ³	10,67	9,82	9,20
Температура, °С	1216	1217	1226
Расход, м ³ /мин	4770	4850	4845
Давление, кгс/см ²	3,48	3,45	3,40
Перепад давления общий, кгс/см ²	1,49	1,46	1,40
Перепад давления верхний, кгс/см ²	0,34	0,33	0,29
Перепад давления нижний, кгс/см ²	1,14	1,13	1,11
Химический анализ чугуна, %:			
[Si]	0,45	0,44	0,49
[S]	0,022	0,022	0,029
Температура чугуна, °С	1453	1448	1460
Химический анализ шлака, %:			
(SiO ₂)	37,93	39,11	40,01
(CaO)	37,91	38,07	38,27
(MgO)	10,23	10,63	10,03
(Al ₂ O ₃)	11,71	11,09	10,65
Основность 1, ед.	1,00	0,97	0,96
Основность 2, ед.	1,27	1,25	1,21
Выход шлака, кг/т чугуна	227,5	240,5	247,0
Рудная нагрузка, т/т чугуна	3,84	3,92	3,86
Качественные характеристики кокса (Б - 5, Б - 6)*, %:			
CSR	46,2	-	-
CRI	36,7	-	-
M ₁₀	7,2	-	-
M ₄₀	65,1	-	-
A ^d	11,0	-	-
S ^d	0,58	-	-
W _Г	2,7	-	-
Качественные характеристики ИПУС (Б - 5, Б - 6)*, %:			
CSR	-	46,4	42,2
CRI	-	37,2	41,1
M ₁₀	-	7,6	7,6
M ₄₀	-	64,1	58,5
A ^d	-	10,8	10,8
S ^d	-	0,50	0,54
W _Г	-	2,6	3,2

*Коксовые батареи №5 и №6

Как следует из приведенных данных в таблице 3.11 и на рисунках 3.7 и 3.8, показатель холодной прочности ИПУС (M₁₀) в течение октября - ноября 2020 г. был относительно стабилен и находился на уровне 7,6%. Показатель горячей прочности CSR находился, в среднем, на достаточно высоком для этого компонента уровне: 46,4% в октябре и 42,2% в ноябре.

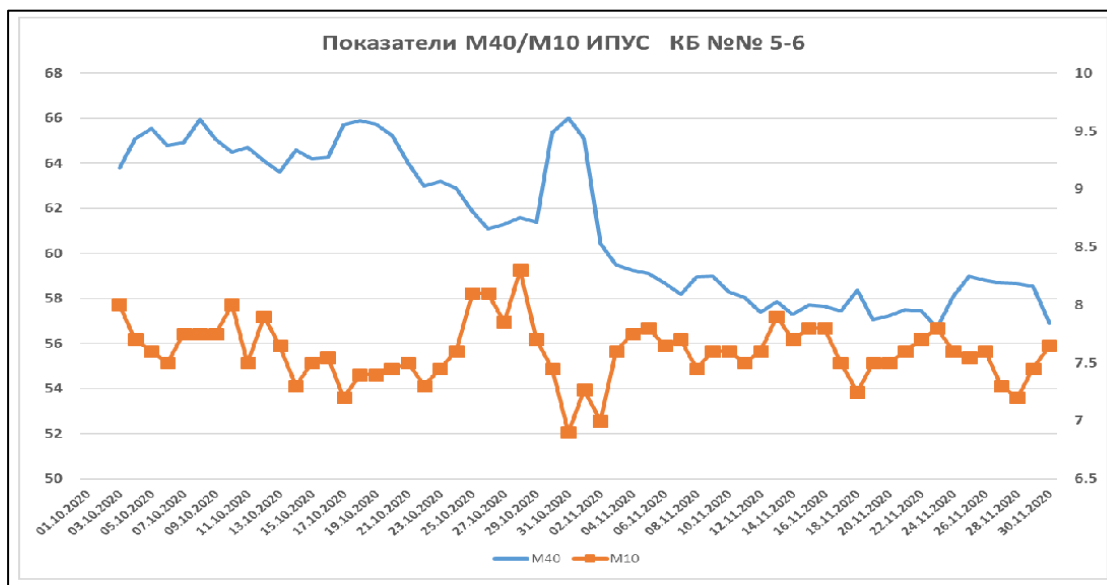


Рисунок 3.7 – Качество ИПУС, полученного в октябре – ноябре 2020 г. на коксовых батареях №5 и №6 по показателям M_{40} и M_{10} (%)

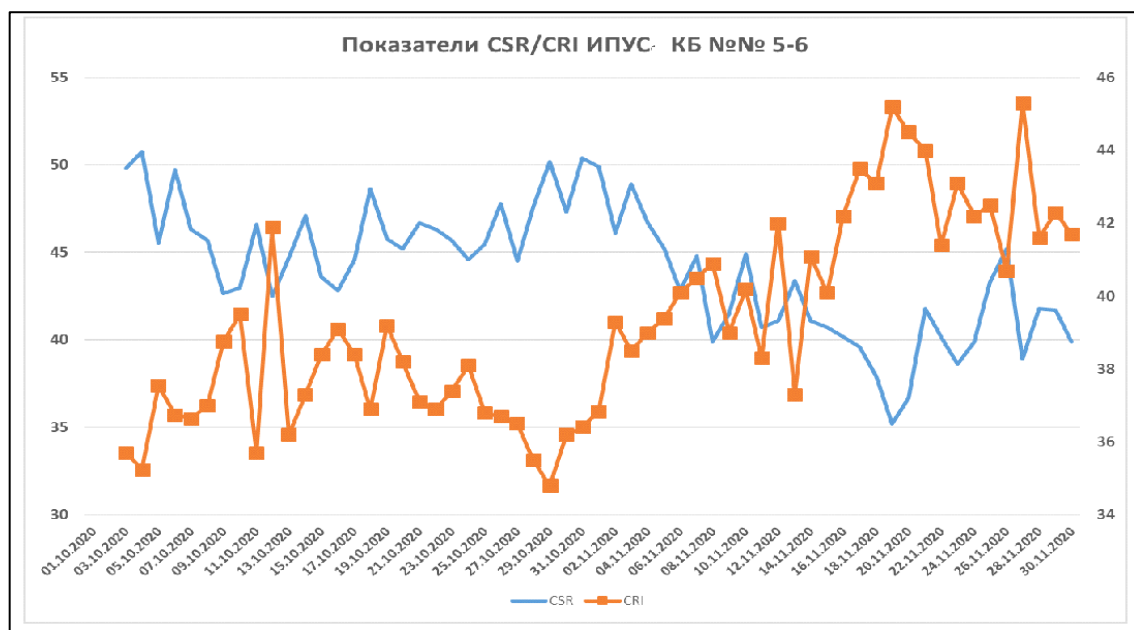


Рисунок 3.8 – Качество ИПУС, полученного в октябре – ноябре 2020 г. на коксовых батареях №5 и №6 по показателям CSR и CRI

Указанный уровень характеристик холодной и горячей прочности ИПУС позволил провести успешное опробование загрузки этого компонента в качестве основного вида топлива и ввести замену «скипового» кокса на ИПУС в постоянную производственную практику без ухудшения технико-экономических показателей

плавки. Удельный расход ИПУС на ДП №4 в октябре и ноябре 2020г., в среднем, составил 358 кг/т чугуна и 370 кг/т чугуна при производстве чугуна: 7244 т/сутки и 6938 т/сутки, соответственно.

Таким образом, переход на новый вид основного топлива был проведен без каких-либо технологических осложнений в работе ДП №4, что свидетельствует о технологической и экономической обоснованности использования этого заменителя кокса в качестве основного углеродсодержащего компонента в условиях работы доменной печи с низкой щелочной нагрузкой ($R_2O < 3,0$ кг/т чугуна) и использовании окатышей прочностью более 220 кг/окатыш.

Выводы по разделу 3

1. Анализ результатов экспериментальных исследований качественных характеристик кокса показал, что при прохождении от поверхности засыпи до фурменного очага:

- средний диаметр кусков кокса уменьшается с 52 - 62,6 мм до 22 - 27 мм;
- порозность коксового слоя уменьшается на 25 – 30 %;
- озоление крупных фракций кокса происходит, в основном, по поверхности.
- горячая прочность кусков фурменного кокса фракции «+25 мм» снижается на 18 – 23 %, а реакционная способность повышается на 30 – 36 % по отношению к исходному уровню;

2. Исследования химического состава и свойств кокса, извлеченного из шахты (отметка 25705 мм) ДП №4 показали, что:

- при опускании кокса до середины шахты его реакционная способность повышается с 36 до 39,3%, при этом горячая прочность снижается с 46 до 44 %;
- при дальнейшем движении кокса к фурменному очагу его реакционная способность увеличивается до 56 %, а горячая прочность понижается до 22 %;
- установлено, 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 2,51раза

- максимальное насыщение куска кокса железосодержащей пылью ограничивается глубиной 1,5 - 3,0 мм.

3. Разработана технология производства инновационного углеродсодержащего продукта (ИПУС) с использованием от 60 до 100% условно коксующихся углей в шихте для коксования. Поэтапное внедрение ИПУСа в составе топливно-восстановительных элементов для доменных печей ПАО «Северсталь» позволило обеспечить 100% замену скипового кокса.

4. Выполнена оценка эффективности разработанных предложений и рекомендаций по использованию ИПУС в доменной плавке, которые показали, что достаточно высокий уровень характеристик холодной и горячей прочности ИПУС ($M_{10} = 7,6\%$, $CSR = 46,4\%$) позволил ввести его в качестве основного вида топлива без ухудшения технико-экономических показателей плавки.

5. По результатам выполненных исследований разработаны изменения в технологические инструкции ПАО «Северсталь» по использованию продукта ИПУС в доменной плавке.

4 РАЗРАБОТКА И ОСВОЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРИЕМОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕКОНДИЦИОННЫХ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

4.1 Исследование влияния использования возврата агломерата на состав и свойства готового продукта аглопроцесса

В процессе подготовки к доменной плавке основные шихтовые материалы (агломерат, окатыши и кокс) подвергаются грохочению с целью отделения некондиционных фракций. Понятие «некондиционные фракции» достаточно условно и критерии его определения на различных металлургических комбинатах могут существенно отличаться. Общепринято, что критерием эффективности процесса грохочения является максимально возможное извлечение железорудных компонентов фракции « -5 мм» из соответствующих надрешетных материалов, поступающих на грохоты. Считается, что в слое соответствующего шихтового материала эти фракции оказывают наиболее негативное влияние на его газопроницаемость. Вместе с тем, в комплексе технологических процессов окускования железорудных шихтовых материалов и последующего доменного передела количество, соотношение и свойства отсеянных фракций компонентов шихты играют важную роль и во многом определяют технико-экономическую эффективность коксоаглодоменного производства в целом.

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. В зависимости от производственной структуры предприятия (наличия аглофабрики), количества образующегося отсева железорудных материалов, логистических возможностей его транспортировки, технологических возможностей систем загрузки доменных

печей и уровня применяемой технологии могут использоваться любой из приведенных способов либо оба способа.

Рациональное количество возврата определяется в результате компромисса между рядом требований к шихте агломерационного и доменного производства. С одной стороны, при подготовке шихты к доменной плавке реализуется требование максимальной степени удаления мелких фракций из шихтовых материалов, что обуславливает повышение газопроницаемости шихты, степени использования восстановительного потенциала газового потока, ровности хода доменной печи, снижение удельного расхода кокса. Более того, перечисленные технологические преимущества отделения мелких фракций от основной массы шихтовых материалов сильнее проявляются при увеличении класса отсева за счет сужения диапазона крупности компонентов шихты. С другой стороны, повышение эффективности грохочения и увеличение класса отсева в доменном производстве приводит к увеличению количества отсеваемых фракций, отправляемых в составе возврата на аглофабрику, и количества крупных фракций в потоке возврата.

Влияние возврата на производительность и качество агломерата неоднозначно. Отмеченный в [121, 122] экстремальный характер зависимости удельной производительности агломашин от содержания возврата в шихте подтверждается результатами анализа среднемесячных значений содержания возврата в составе шихты и удельной производительности спекательных машин агломерационного цеха АГЦ-3 ПАО «Северсталь» (рисунок 4.1). Как видно, удельная производительность агломашин достигает максимума при содержании возврата в аглошихте на уровне $\sim 34 - 38 \%$.

Этот результат может использоваться в качестве критерия определения рационального уровня содержания возврата в аглошихте только в том случае, если производительность аглопроизводства имеет приоритетное значение по отношению к качеству годного продукта [123]. Повышение содержания возврата в аглошихте негативно сказывается на прочностных характеристиках агломерата, проявляющихся не только в процессе его транспортировки и загрузки в доменную печь, но и непосредственно в процессе доменной плавки.

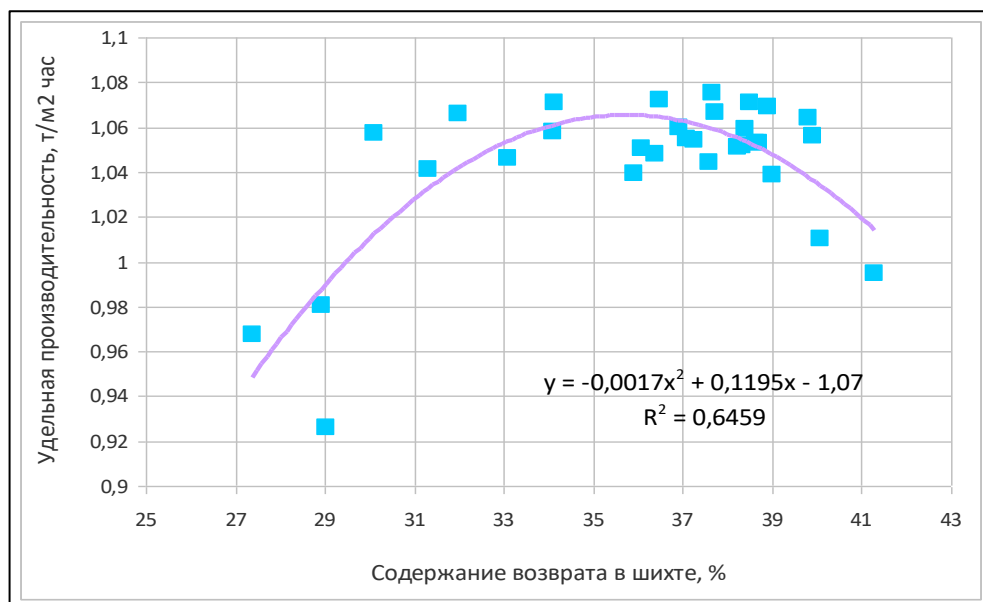


Рисунок 4.1 – Зависимость удельной производительности агломашин АГЦ-3 ПАО «Северсталь» от содержания возврата в шихте

В настоящей работе впервые исследовалось влияние содержания возврата в аглошихте на высокотемпературные прочностные свойства агломерата, характеризующиеся показателем $RDI_{3,15}$ (рисунок 4.2).

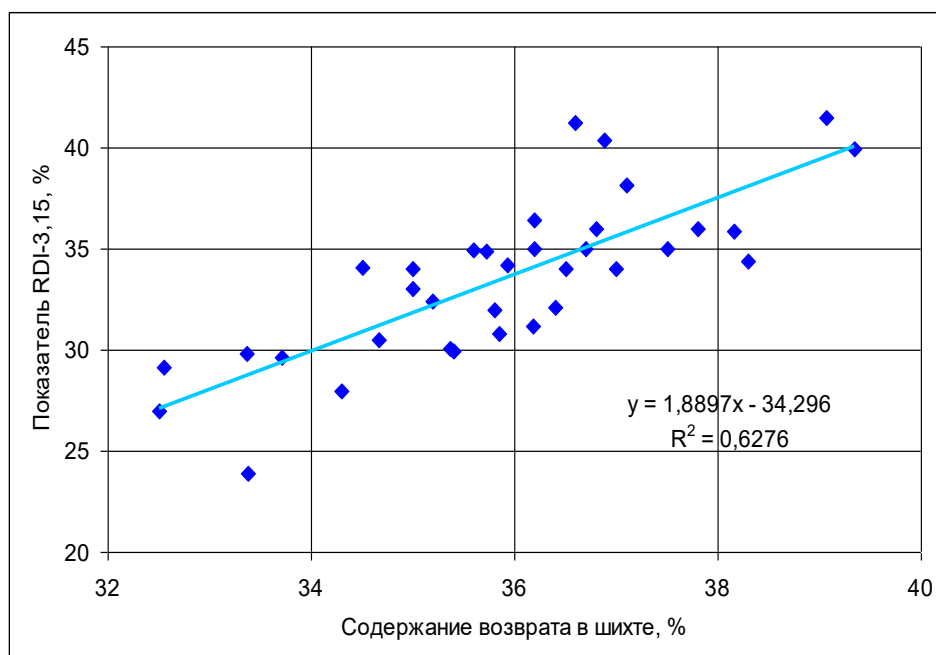


Рисунок 4.2 – Зависимость показателя $RDI_{3,15}$ агломерата от содержания возврата в шихте в технологических условиях АГЦ-3 ПАО «Северсталь»

Повышение содержания возврата в аглошихте на 1% обуславливает увеличение показателя $RDI_{-3,15} \sim$ на 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 (рисунки 4.3 и 4.4).

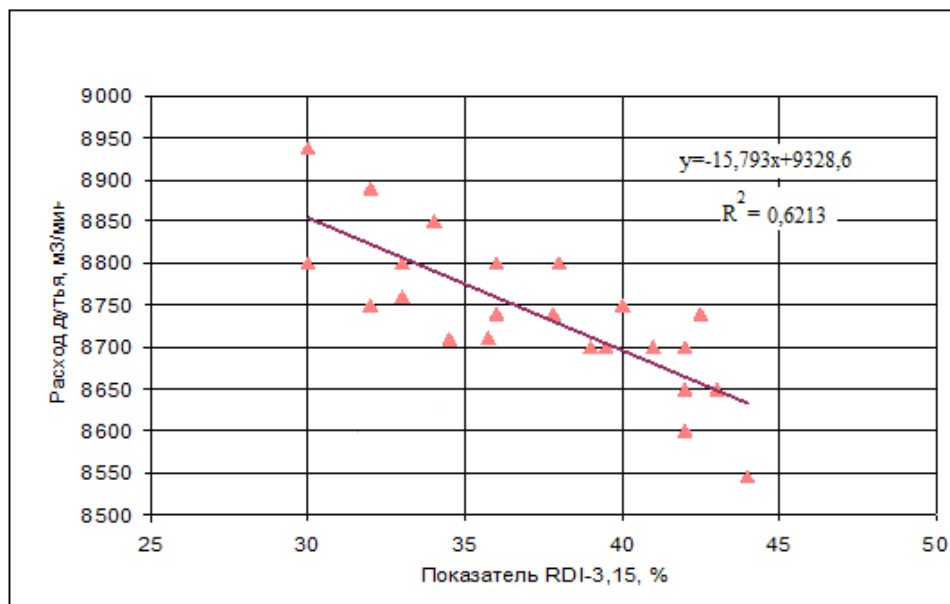


Рисунок 4.3 – Зависимость расхода дутья от показателя $RDI_{-3,15}$ агломерата на ДП №5 ПАО «Северсталь»

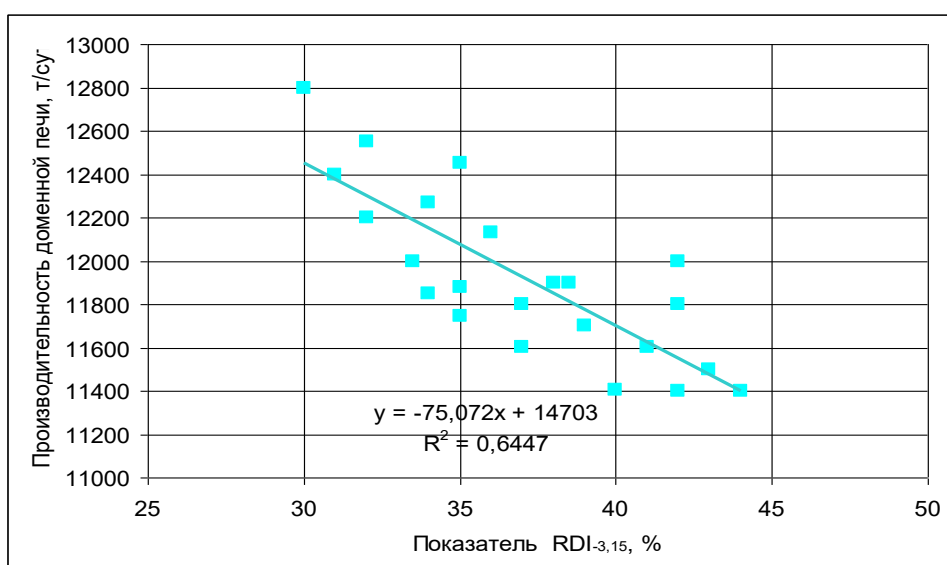


Рисунок 4.4 – Зависимость производительности ДП №5 ПАО «Северсталь» от показателя $RDI_{-3,15}$ агломерата

При увеличении показателя агломерата $RDI_{-3,15}$ повышается температура колошникового газа (рисунок 4.5), что, соответственно, обуславливает увеличение удельного расхода кокса. По результатам оценки, выполненной на ДП №5 ПАО «Северсталь», на каждые 10 °С повышения температуры колошникового газа происходит увеличение удельного расхода кокса на 0,5 – 1,2 кг/т чугуна. Поэтому, помимо известных негативных последствий увеличения количества возврата в шихте, предельный уровень возврата ограничивается также его влиянием на показатели низкотемпературной прочности агломерата $RDI_{-3,15}$ (ISO - 4696-1) или $LTD_{-3,15}$ (ISO 13930).

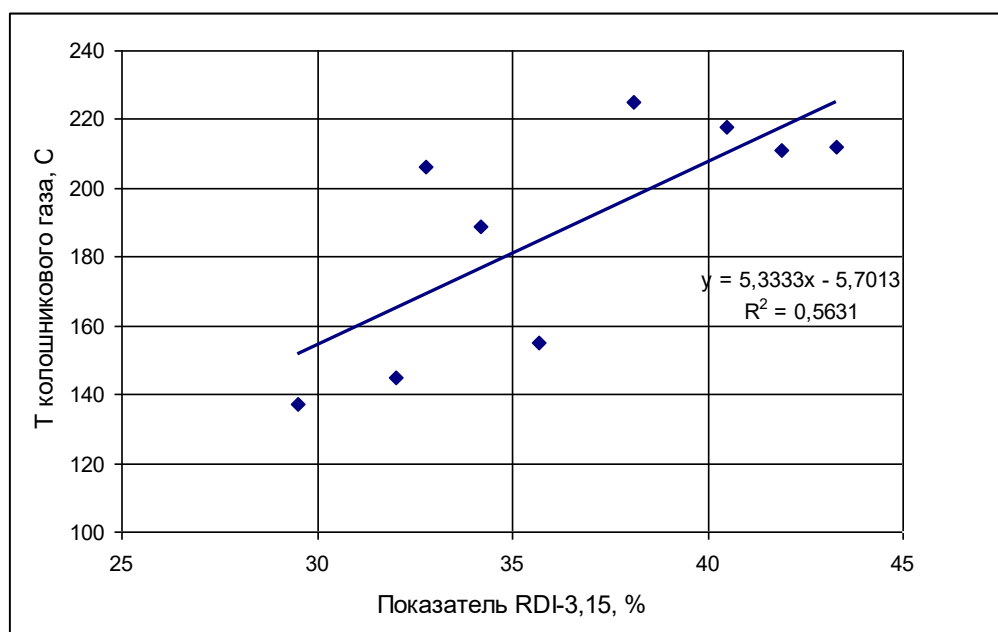


Рисунок 4.5 – Зависимость температуры колошникового газа от показателя $RDI_{-3,15}$ агломерата

Таким образом, отсев железорудных материалов, образующийся в доменном цехе, за редким исключением, обязательно будет являться компонентом потока возврата в агломерационном производстве, но, по возможности, его количество в процессе спекания агломерата должно быть снижено. Рациональным направлением решения этой задачи является использование отсева железорудных материалов непосредственно в доменном процессе.

4.2 Совершенствование технологических требований к распределению агломерата и окатышей по сечению доменной печи и способов загрузки отсеваемых фракций железорудных компонентов шихты

4.2.1 Разработка технологических ограничений по количеству отсева железорудных материалов, загружаемого в доменную печь

Для обеспечения стабильной высокоэффективной работы доменной печи основные компоненты железорудной части доменной шихты (агломерат и окатыши) загружаются с соблюдением ряда технологических требований, реализация которых обеспечивает рациональное распределение этих компонентов в рабочем пространстве доменной печи [124]:

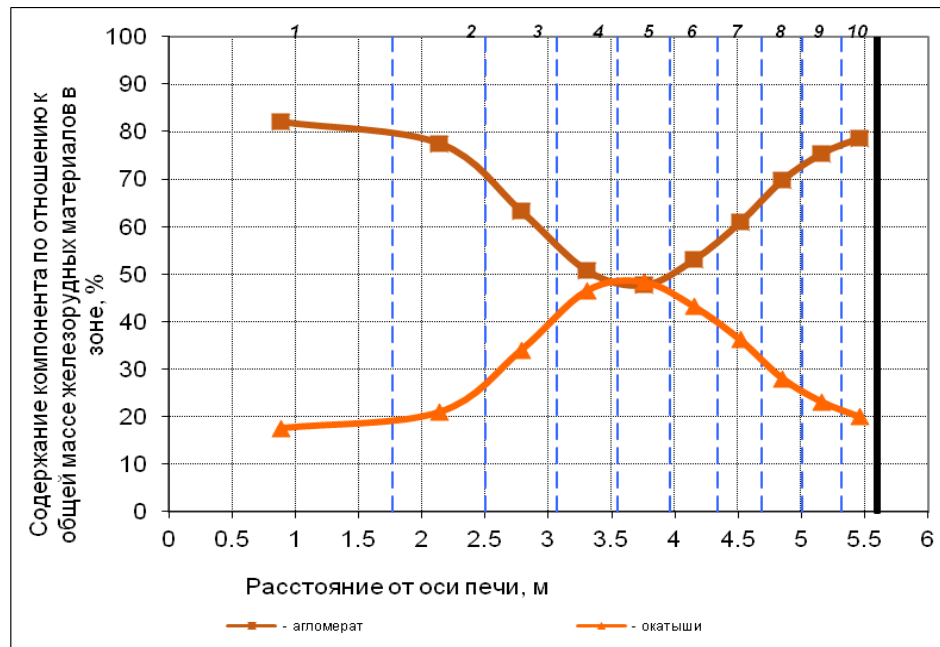
- обеспечение заданного ограничения по содержанию FeO в первичном шлаковом расплаве в пристеночной зоне за счет снижения содержания в ней окатышей;
- предварительное смешивание окатышей с агломератом перед подачей на колошник;
- сосредоточение основной массы окатышей в промежуточной зоне колошника.

Допускается увеличение концентрации окатышей в осевой зоне при направленной их загрузке в эту зону с целью увеличения количества жидких фаз с повышенным содержанием закиси железа, очищающих центральный столб малоподвижных материалов от коксового мусора.

Заданное распределение окатышей по радиусу колошника достигается путем выбора рациональных параметров формирования железорудных смешанных порций, в первую очередь, массы головной части порции из агломерата.

Пониженное содержание окатышей в периферийной зоне доменной печи, обеспечивающее требуемое ограничение содержания FeO в образующемся в этой зоне расплаве, достигается путем загрузки несмешанного с окатышами агломерата в нижний слой шихтовых материалов в бункере бесконусного загрузочного

устройства (БЗУ) или в межконусном пространстве, что обеспечивает последующую первоочередную выгрузку несмешанного с окатышами агломерата в периферийную зону колошника. Размещение несмешанного агломерата в нижнем слое шихтовых материалов в бункере БЗУ или в межконусном пространстве реализуется при помощи специальных технологических приемов, предусматривающих наличие головной части из агломерата в железорудной порции на конвейере или верхнего слоя из агломерата в первом скипе железорудной части подачи. На рисунке 4.6 приведено типичное распределение основных железорудных компонентов по радиусу колошника ДП №5, полученное методом математического моделирования процесса загрузки этой печи.



1 - 10 – номера кольцевой зоны колошника.

Рисунок 4.6 – Типичное распределение основных железорудных компонентов шихты по радиусу колошника ДП №5

При загрузке доменных печей с БЗУ наличие головной части порции из агломерата в соответствии с результатами исследований, выполненных с помощью расчетных методов при различных значениях массы этой части, обеспечивает снижение содержания окатышей в пристеночной зоне доменной печи до 0,55 - 0,60 среднего содержания окатышей в шихте (в железорудной порции) с соответствующим повышением их содержания в промежуточной зоне в 2,0 - 2,5

раза по отношению к среднему содержанию в порции. На печах с конусными загрузочными устройствами при загрузке в первый скип железорудной части подачи агломерата и всей массы окатышей во второй скип в пристеночной зоне содержание окатышей может быть снижено до 0,6 - 0,7 среднего значения для окатышей в железорудной части подачи. В соответствии с результатами ряда ранее выполненных исследований [125, 126] газопроницаемость слоя агломерата выше соответствующего показателя для смеси агломерата и окатышей на 20 - 30%.

Более высокий перепад давления в смеси агломерата и окатышей по сравнению со слоем агломерата объясняется уменьшением эквивалентного диаметра каналов, различием коэффициентов формы окатышей, агломерата и мелочи, неравномерным распределением окатышей относительно агломерата в слое, возникновением дополнительного сопротивления в пограничном слое и более плотной упаковкой частиц.

Таким образом, реализация приведенных выше технологических требований к распределению основных железорудных компонентов шихты создает условия для повышения газопроницаемости периферийной зоны колошника, что усугубляется сегрегацией материалов при выгрузке на поверхность засыпи и, так называемым, «пристеночным эффектом» увеличения порозности слоя материалов, примыкающего к стенке печи, а также снижения местных сопротивлений движению газов. Чрезмерное разрыхление материалов в периферийной зоне доменной печи не должно иметь места, так как это приводит к ухудшению использования восстановительной и тепловой энергии газов, загромождению осевой зоны, похолоданию горна и неустойчивому ходу печи, особенно большого объема, а также преждевременному выходу из строя кладки шахты.

Вместе с тем, ровный ход и высокая производительность доменной печи при низком удельном расходе кокса достигаются при высокой степени использования газов, которая, в свою очередь, обеспечивается лишь при равномерном контакте газа с кусками железорудной шихты во всех сечениях доменной печи, за исключением осевой зоны. Поддержание стабильного развитого осевого газового потока способствует технологической устойчивости процесса плавки. Это условие

может быть реализовано при относительном выравнивании газодинамического сопротивления слоев шихты в периферийной и промежуточной зонах колошника. Решением этой задачи может быть загрузка отсева железорудных материалов в пристеночную зону доменной печи путем замены части агломерата надрешетных фракций в головной части порции на конвейере или в верхнем слое первого железорудного скипа подачи отсевом железорудных материалов. Количество этого отсева может определяться, исходя из потребности агломерационного производства, как количество, превышающее рациональный и технологически обоснованный уровень содержания возврата в аглошихте, что, кроме поддержания этого уровня, обеспечит дополнительный положительный эффект, обусловленный стабилизацией режима возврата в агломерационном процессе. Поэтому можно сделать вывод, что технологические требования к загрузке агломерата и окатышей следует дополнить положением, указывающим целесообразность замены надрешетного агломерата в головной части порции на конвейере или в верхнем слое первого железорудного скипа подачи на отсев железорудных материалов.

При определении количества отсева железорудных материалов, которое может использоваться для загрузки в доменную печь, следует учитывать, что периферийная зона доменной печи, как правило, загружается преимущественно агломератом, количество которого в этой зоне составляет 70 – 90 %, а в отдельных случаях доходит до 100%. При нагреве шихтовых материалов до 600 – 700 °С агломерат будет разрушаться с образованием мелких фракций более интенсивно, чем окатыши, следовательно, в периферийной зоне на этом уровне увеличение количества мелких фракций будет больше по отношению к увеличению количества мелочи в промежуточной зоне печи.

4.2.2 Разработка способа загрузки отсеянных фракций агломерата и окатышей

Для загрузки отсеянных фракций агломерата и окатышей в составе железорудной части подач разработаны способы загрузки доменной печи,

регламентирующие количество и периодичность загрузки этого компонента [127]. Количество отсева железорудных материалов, которое вводится в головную часть железорудной порции (в верхний слой первого железорудного скипа подачи) для выравнивания газового потока по сечению печи с учетом дополнительного образования мелочи при восстановительно-тепловой обработке надрешетной фракции, не должно быть критичным и не должно создавать «запирающий» периферию эффект. Допустимое количество этого компонента в подаче определялось опытным путем на ДП № 5 объемом 5500 м³ с конвейерной подачей шихты на колошник с использованием предложенной эмпирической формулы (4.1) для его предварительного расчетного определения:

$$M = K \cdot M_{\Gamma} \cdot [100 - A \cdot (100 - R)] / 100, \quad (4.1)$$

где: M – масса подрешетных фракций железорудных материалов (агломерата) в головной части загружаемой железорудной порции, т;

K – эмпирический коэффициент, равный 0,10 - 0,25;

M_{Γ} – масса головной части из агломерата в загружаемой железорудной порции, т;

A – содержание агломерата в железорудной порции, ед.;

R – показатель прочности агломерата при восстановительно-тепловой обработке, %.

При этом показатель прочности агломерата R определяют экспериментально по выходу фракции крупнее 6,3 мм в соответствии со стандартом ИСО 4696-1. Образование мелкой фракции при восстановительно-тепловой обработке надрешетной фракции агломерата оценивают по выражению $(100-R)$ %. Периодичность загрузки подач с отсевом железорудных материалов в цикле загрузки (в цикле подач) предложено устанавливать обратно пропорционально ее количеству в интервале 1/1 - 1/5 подачи (каждая подача – каждая пятая подача).

При традиционной технологии плавки и соотношении агломерат: окатыши 75:25 в железорудной части шихты для ДП №5 расход кокса составлял 442 кг/т

чугуна и производительность 11200 т/сутки. В процессе длительной кампании опытным путем при проплавке агломерата и окатышей установили оптимальную массу агломерата в головной части железорудной порции, которая составила соответственно 35 т (общая масса агломерата и окатышей в порции 135 т) и 18 т (общая масса агломерата и окатышей в порции 60 т).

В опытных плавках, проведенных на ДП №5, доля агломерата в железорудной части шихты составляла 75 и 60%. Головная часть загружаемой порции железорудных материалов состояла из агломерата и направлялась с помощью БЗУ в периферийную зону колошника, т.к. окатыши обладают повышенной «агрессивностью» к огнеупорной футеровке печи и отодвигались от нее. В процессе проведения эксперимента отбирали пробы надрешетного агломерата для прогноза его разрушения при восстановительно-тепловой обработке в доменной печи.

Массу подрешетной фракции М при коэффициенте К, равном 0,1, и доле агломерата в железорудной порции 60% (А=0,6ед.) рассчитывали по формуле (4.1):

$$M=0,1 \cdot 18[100-0,60 \cdot (100-50)]/100=1,26 \text{ т}$$

При коэффициенте К, равном 0,25, и доле агломерата в железорудной порции 75% (А=0,75 ед.):

$$M=0,25 \cdot 18[100-0,75 \cdot (100-59,7)]/100=3,14 \text{ т}$$

Результаты промышленных испытаний приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Параметры режима загрузки отсева железорудных материалов в ДП № 5 и показатели плавки

Параметр							
М, т	Мг, т	Периодичность ввода отсева, 1/подач	R, %	А*, ед.	Производство чугуна, т/сут	Удельный расход кокса, кг/т чугуна	К
2,45	35,0	1/1	59,7	0,60/0,75	11250	439	0,1
6,10	35,0	1/3 – 1/5	59,7	0,60/0,75	11440	438 - 439	0,25
7,25	35,0	1/5	59,7	0,60/0,75	11050	445	0,30

*числитель – содержание агломерата в шихте 60%; знаменатель – содержание агломерата в шихте 75%.

Результаты промышленных испытаний предложенного способа показали, что экономия кокса и увеличение производительности на ДП №5 имело место при массе подрешетной фракции, заменяющей массу надрешетной фракции в головной части железорудной порции из агломерата, при расчете по формуле (4.1) с использованием эмпирического коэффициента K в пределах 0,1 - 0,25. При величине K более 0,25 масса мелкой фракции достигала критической величины и показатели плавки ухудшались. С увеличением массы M периодичность ввода мелочи изменяли от 1/1 подачи до каждой 1/3 - 1/5 подачи. Температура газа на периферии шахт доменных печей при применении режимов, регламентируемых предложенным способом загрузки доменной печи, уменьшалась на 40 - 70 °С по сравнению с работой в традиционном режиме.

При применении разработанного способа [127] на доменных печах с БЗУ следует обеспечить усиленный контроль температур периферийного газового потока и оценку их равномерности по окружности печи, поскольку выгрузка недостаточного для образования замкнутого кольца количества отсева в начальной фазе выгрузки порции, может обусловить возникновение существенной окружной неравномерности распределения железорудных материалов в пристеночном слое по гранулометрическому составу, что, в свою очередь, может привести к неравномерности распределения газового потока и развитию канального хода. Равномерность окружного распределения шихты предопределяет равномерность распределения газового потока по окружности доменной печи и является одним из необходимых условий высокопроизводительной экономичной ее работы. Важность требования равномерности окружного распределения шихты и газов в доменной печи подтверждается тем, что предельные отклонения локальных температур газового потока от среднего значения, которые контролируются при помощи периферийных термопар, устанавливаются специальными положениями технологических инструкций по выплавке чугуна. Пределы указанных отклонений устанавливаются различными для конкретной доменной печи с учетом ее газодинамического режима, интенсивности плавки и шихтовых условий. Вместе с тем, на большинстве доменных печей, работающих с высокими технико-

экономическими показателями, предельные отклонения от среднего значения ограничиваются значениями 50 - 80°C.

При загрузке железорудных порций шихтовых материалов в доменную печь головная часть порции, включающая дозу подрешетных фракций и поступающая в бункер загрузочного устройства первой, в бункере располагается в виде нижнего слоя. Известно, что при выгрузке железорудных порций из бункеров слои различных материалов частично смешиваются, что обусловлено закономерностями истечения шихтовых материалов из бункеров. Результатами экспериментальных исследований установлено, что удельные (на единицу площади выпускного отверстия) расходы подрешетных и надрешетных фракций железорудных материалов при выгрузке из бункеров БЗУ значительно отличаются: удельный расход подрешетных фракций на 20 – 50 % выше, чем при выгрузке надрешетных железорудных материалов. При загрузке в доменную печь железорудных материалов это может создать соответствующую неравномерность распределения газового потока, неравномерный сход шихты, снижение степени использования восстановительного и теплового потенциалов газа, повышение расхода кокса и уменьшение производства чугуна

Для устранения негативных ситуаций, связанных с окружной неравномерностью распределения шихтовых материалов и газового потока, был разработан [128] способ загрузки доменной печи, оснащенной лотковым БЗУ, включающий грохочение шихтовых материалов, их дозирование, формирование железорудных и коксовых порций, в головную часть которых вводят дозы подрешетных фракций железорудных материалов, загрузку сформированных порций в доменную печь и распределение их по заданной программе на колошнике. В соответствии с разработанным способом при формировании порций, содержащих подрешетные фракции железорудных материалов, масса дозы этих фракций, загружаемой в составе одной порции, определяется по формуле (4.2):

$$m_{\text{о жрм}} = n_{\text{кз}} \cdot \gamma_{\text{м}} \cdot q_{\text{м}} / (v_{\text{л}} \cdot k_{\text{им}}), \quad (4.2)$$

где:

$n_{кз}$ – заданное количество замкнутых оборотов лотка БЗУ, в которые выгружаются подрешетные фракции железорудных материалов при выгрузке порции на поверхность засыпи;

γ_m – насыпная масса подрешетных фракций железорудных материалов, т/м³;

q_m – объемный расход при выгрузке подрешетных фракций железорудных материалов из бункера БЗУ, м³/с;

ν_l – частота вращения лотка БЗУ, с⁻¹;

$k_{им}$ – коэффициент, учитывающий различный характер истечения подрешетных фракций железорудных материалов из бункера БЗУ, при загрузке их в составе железорудных и коксовых порций.

Коэффициент, учитывающий различный характер истечения подрешетных фракций железорудных материалов из бункера БЗУ, определен на основании результатов математического моделирования и экспериментальных исследований процесса выгрузки порций шихты на колошник. При загрузке подрешетных фракций железорудных материалов в составе железорудных порций $k_{им}$ принят равным 0,25 - 0,5, а при загрузке в составе коксовых порций 0,75 - 0,95.

В период промышленных испытаний разработанного способа на ДП №5 объемом 5500 м³ зафиксировано уменьшение среднеквадратических отклонений значений показаний периферийных термопар в 1,7 - 2 раза при уменьшении абсолютных значений температур на 60 – 80 °С по сравнению с показателями, полученными при работе в обычном режиме.

Разработанные способы загрузки доменной печи [127, 128], включающие загрузку отсеваемых фракций железорудных материалов, внесены в виде положений технологических инструкций по выплавке чугуна на доменных печах ПАО «Северсталь», регламентирующих специальные режимы доменной плавки.

Выводы по разделу 4

1. Впервые в отечественной практике 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.

2. Определено, что при использовании в составе доменной шихты отсева железорудных материалов сокращается расход «скипового» агломерата на выплавку чугуна. Количество отсева железорудных материалов, загружаемого в составе железорудных порций, определяется в зависимости от содержания агломерата в шихте, массы агломерата в головной части железорудных порций и количества мелкой фракции, образующейся при восстановительно-тепловой обработке «скипового» агломерата. Доза отсева железорудных материалов располагается на конвейере перед головной частью железорудной порции. Суммарная масса головной части железорудной порции, состоящая из агломерата и отсева железорудных материалов остается постоянной.

3. Разработана и реализована опытная плавка с использованием отсева железорудных материалов, показавшая возможность использования этого компонента в шихте в количестве до 200 т/сутки (6000 т/месяц). Подобран режим загрузки и структуры порций, включающих отсев железорудных материалов, которые с учетом программы их распределения обеспечили устойчивую работу доменной печи №5 с заменой 1,0 – 1,5% кондиционного «скипового» агломерата его отсевом.

4. Показано, что рациональная масса отсева железорудных материалов, загружаемого в составе одной порции ограничивается диапазоном 3,0 – 7,0 т., которую целесообразно располагать в порции на конвейере перед остальными компонентами с обеспечением минимального смешивания отсева с другими компонентами.

5. Впервые получена эмпирическая зависимость горячей прочности готового агломерата от количества возврата в составе агломерационной шихты и определено рациональное количество возврата для шихтовых условий АГЦ-3.

6. Разработанные способы загрузки ДП, регламентирующие количество и периодичность загрузки отсеянных фракций агломерата и окатышей в составе железорудной части подач внесены в виде положений технологических инструкций по выплавке чугуна на доменных печах ПАО «Северсталь».

5. РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ НА КОМБИНИРОВАННОМ ДУТЬЕ С ПОВЫШЕННЫМ РАСХОДОМ ПРИРОДНОГО ГАЗА

5.1 Критерии оценки эффективности замены кокса природным газом

Разработка необходимых технологических мероприятий по замене части кокса на природный газ (ПГ) предполагает определение и учет содержащихся в последнем восстановительных компонентов и величину теплового эффекта его превращения в фурменной зоне доменной печи.

Многочисленные исследования [129, 130], проведенные по разработке технологии ведения доменной плавки на комбинированном дутье, позволили установить технические показатели, необходимые для определения рационального количества ПГ. В качестве таких показателей наиболее часто используются такие параметры как теоретическая температура газа у фурм [131, 132, 133], учитывающая совместный процесс горения углерода, кокса, ПГ и коэффициент замены кокса природным газом (Ψ) [134].

Теоретическая температура горения (ТТГ) кокса перед фурмами является важным показателем работы доменной печи, которая широко применяется как в расчетах, так и в практике доменного процесса для определения оптимальных расходов топливных добавок и оценки хода доменной плавки.

Разработанные способы расчета и выбора величины ТТГ основываются как на результатах специальных исследований, так и практических данных работы доменных печей. Наиболее часто используются зависимости для определения ТТГ, разработанные А. Н. Раммом [130], В.В. Касьяном [131] и рядом других специалистов [135]. Согласно основным положениям теории доменного процесса рациональные значения ТТГ в диапазоне от 1800 °С до 2150 °С могут быть реализованы при определенном соотношении ПГ и кислорода в дутье. Нижний предел ТТГ ограничивается минимальным значением степени прямого

восстановления, и достигает, по мнению исследователей [136], величины 1880 °С. Верхний предел, по некоторым оценкам [137], может достигать 2300 °С и более.

Поскольку низкая температура газа у фурм (1700 – 1800 °С) соответствует расходу природного газа с недостаточной компенсацией его кислородом дутья и приводит к неблагоприятным температурно – тепловым условиям по сечению горна, а также уменьшению интенсивности плавки по коксу и руде при неизменной рудной нагрузке, то на практике величину ТТГ, как правило, стремятся поддерживать ближе к верхнему пределу [138]. В то же время, абсолютное значение показателя ТТГ, рассчитанное с учетом различных факторов, может отличаться на значимую величину и, более правильно, при принятии решений пользоваться не абсолютным значением, а относительным изменением этого параметра.

Коэффициент (Ψ) замены кокса ПГ, который является также критерием эффективности комбинированного дутья, поскольку зависит от комплекса физико – химических и тепловых процессов в фурменной зоне, определяется из соотношения $\Psi = \Delta K / \Delta \text{ПГ}$, где ΔK – изменение удельного расхода кокса, кг/т чугуна; $\Delta \text{ПГ}$ – изменение расхода природного газа, м³/т чугуна.

По данным [139] коэффициент Ψ может быть определен по эмпирической формуле (5.1), куда входят ТТГ (°С) и уровень развития прямого восстановления оксидов железа в печи (r_d):

$$\Psi = (3,2 \text{ ТТГ} / 2000 + 2,3) \cdot Dr_d, \quad (5.1)$$

где Dr_d – изменение степени прямого восстановления от базового значения или условного уровня, ед.

По уравнению (5.1) Ψ определяется с достаточной степенью точности, а величина Dr_d для многих случаев практики находится из соотношения (5.2):

$$Dr_d = 0,20 - 2,5 \cdot 10^{-4} \cdot S_{\text{ПГ}}, \quad (5.2)$$

где $S_{\text{ПГ}}$ – расход ПГ, м³/т чугуна.

Таким образом величина Ψ может быть определена исходя из практических величин расхода ПГ и вычисленной ТТГ, значения которой зависят от параметров дутьевого режима.

Коэффициент замены кокса природным газом (Y) по мнению авторов [137, 140, 141], может быть достаточно точно определён через отношение количества тепла, выделяющегося от окисления ПГ кислородом шихты, и тепла, образующегося при окислении в печи 1 кг кокса, по уравнению (5.3):

$$Y = (10802m \cdot h_{H_2} + 12648g \cdot h_{CO}) / [1,866 C_k \cdot (5250 + 12648 h_{CO})], \quad (5.3)$$

где:

m и g – содержание водорода и углерода в ПГ, соответственно, m^3/m^3 ;

h_{H_2} и h_{CO} – степени использования H_2 и CO в печи, соответственно, ед.;

C_k – содержание углерода в коксе, ед.

Если принять, что соотношение $h_{H_2}:h_{CO} = x$ может быть определено по уравнению, согласно [142]: $x = 1,41 - 1,07 h_{CO}$ (5.4), то величину коэффициента замены кокса ПГ можно, согласно уравнению (5.3), варьировать направленным изменением h_{CO} путем подбора шихтовых материалов соответствующего качества (по составу и физическим свойствам) и их распределения на колошнике печи.

Исследованиями [143] установлено, что критерий h_{H_2} , количество удаляемого из шихты кислорода $O_{ш}$, общий расход водорода $H_2_{общ}$ и показатель непрямого восстановления R_i связаны соотношениями (5.5) и (5.6):

$$h_{H_2} = O_{ш} (1,2 - 0,9 H_2_{общ}) \quad (5.5)$$

$$h_{H_2} = 0,75 O_{ш} / R_i \quad (5.6)$$

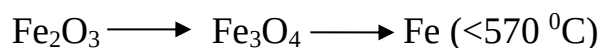
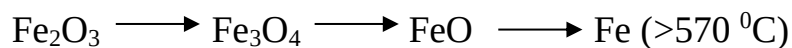
Это дало возможность прогнозировать величину критерия h_{H_2} в перспективных доменных плавках с увеличенным расходом ПГ.

Информативной оказалась замеченная тенденция восстановительной работы водорода по радиусу печи, которая, как показала практика, происходит неравномерно, снижаясь от периферии к осевой зоне доменной печи. Вероятно, это обусловлено значительно меньшей плотностью водорода по сравнению с другими компонентами газа (CO_2 , CO , N_2). Согласно исследованиям [144, 145] метан природного газа исчезает сразу на срезе фурм, а величина кинетической энергии дутья недостаточна для заброски легкого H_2 вглубь горна. Это приводит к неравномерному использованию восстановительной способности водорода по радиусу печи.

5.2 Исследование влияния водорода в составе смесей восстановительных и восстановительно – окислительных газов на процессы «восстановления – плавления» железорудных материалов

Стремление к сокращению экономических затрат на доменный кокс заменой более дешевым природным газом приводит к вдуванию значительных объемов ПГ и, как следствие, к увеличению доли водорода в газах доменных печей. Этот процесс повсеместно сопровождается уменьшением степени прямого восстановления окислов железа и расходов кокса, что связано с увеличением концентрации и составом восстановительных газов. Изучение влияния водорода на изменение теплового и восстановительного процессов в доменной печи необходимо для более эффективного использования природного газа.

Термодинамика процессов восстановления высших оксидов железа до железа металлического хорошо изучена [146]. Процесс восстановления высших оксидов железа до низших и до металлического железа под действием CO и H₂ протекает ступенчато, согласно уравнений:



Суммарный тепловой эффект процесса восстановления оксидов железа в случае восстановления под действием CO является слабо экзотермическим (~230 кДж/кг Fe), а при восстановлении водородом – эндотермическим (~880 кДж/кг Fe). Из этого следует, что восстановление под действием CO проходит термодинамически легче при низкой температуре, чем при высокой, а активность H₂ возрастает с ростом температуры. Температура 810 °C является точкой эквивалентности активности CO и H₂, выше которой водород становится более сильным восстановителем, чем монооксид углерода.

Таким образом, термодинамические расчеты показывают [147], что CO обладает более высокой восстановительной способностью при более низких температурах, тогда как восстановление H₂ термодинамически выгодно при более высоких температурах. В целом, в процессе восстановления водородом

необходимо обеспечить дополнительную энергию для восстановления, кроме энергии, необходимой для нагрева материалов. Результаты исследования механизма непрямого восстановления показали, что начальная стадия данного процесса контролируется межфазной химической реакцией (газ - твердое тело), а более поздняя стадия контролируется скоростью диффузии.

Для исследования влияния водорода в составе смесей восстановительных и восстановительно-окислительных газов на процессы восстановления, плавления и капельного течения используемых на ПАО «Северсталь» железорудных материалов, различного химического состава и способа окускования была исследована их восстановимость и проведена серия лабораторных плавок, предварительно восстановленных агломерата и окатышей. Объектом исследований служили промышленные неофлюсованные и частично офлюсованные окатыши, а также лабораторный магнезиальный агломерат, химический состав которых представлен в таблице 5.1.

Таблица 5.1 - Химический состав железорудного сырья

Наименование материала	Химический состав, %						Основность, ед.
	Fe _{общ.}	FeO	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	
Агломерат	50,64	11,2	9,3	14,23	-	2,8	1,53
Окатыши 1	62,8	1,2	7,65	0,8	0,8	0,6	неофл.
Окатыши 2*	65,6	2,77	3,83	1,77	0,31	0,2	0,46

* окатыши ГОК Костомукша

По условиям эксперимента (ISO 4695) в установку RDI (ПАО Северсталь) загружали слой агломерата или окатышей массой 150 - 500 г крупностью 8 – 16мм и нагревали в токе аргона до температуры 950 °С. При температуре 950 °С инертный газ заменяли восстановительным (различного состава) или восстановительно-окислительным и подавали со скоростью 3 или 5 л/мин. Такой режим выдерживали в течение 60 мин., после чего образец охлаждали в токе аргона

и определяли потерю массы образца, содержание в нем $Fe_{мет.}$, степень восстановимости R_f , %.

На второй стадии эксперимента восстановленные материалы проплавливали в плавильной печи, где определялись температуры полной потери газопроницаемости слоя, начала и максимальной фильтрации жидких фаз, а также определялась масса первичного шлака и содержание в нем FeO . Обобщенные результаты испытаний представлены в таблицах 5.2 - 5.3 и на рисунках 5.1 - 5.6.

Таблица 5.2 – Результаты исследований влияния водорода в составе смесей восстановительных и восстановительно - окислительных газов на процессы восстановления железорудных материалов

Обозначение смеси газов	Состав газовой смеси	Расход газа, л/мин	Потеря массы, %	R_f , %	$Fe_{мет.}$, %
Окатыши 1					
A0	0% H_2 + 33% CO + 67% N_2	3	7,47	26,7	5,5
A5	5% H_2 + 30% CO + 65% N_2	3	9,1	33,8	4,9
A10	10% H_2 + 30% CO + 60% N_2	3	9,2	34,3	11,5
A15	15% H_2 + 30% CO + 55% N_2	3	9,33	34,8	12,8
A20	20% H_2 + 30% CO + 50% N_2	3	12,0	44,5	20,5
A33	33% H_2 + 0% CO + 67% N_2	3	12,4	45,6	23,8
D0	23% CO_2 +23% CO + 54% N_2 +0% H_2	3	4,6	17,7	0,65
D5	21,8% CO_2 +21,8% CO + 51,4% N_2 +5% H_2	3	6,0	22,8	1,0
D10	20,7% CO_2 +20,7% CO + 48,6% N_2 +10% H_2	3	7,6	28,5	1,2
D20	18,4% CO_2 +18,4% CO + 43,2% N_2 +20% H_2	3	8,13	30,5	2,7
D0	23% CO_2 +23% CO + 54% N_2 +0% H_2	5	6,9	26,2	0,33
D5	21,8% CO_2 +21,8% CO + 51,4% N_2 +5% H_2	5	8,3	27,4	1,85
D10	20,7% CO_2 +20,7% CO + 48,6% N_2 +10% H_2	5	10,7	38,85	7,75
D20	18,4% CO_2 +18,4% CO + 43,2% N_2 +20% H_2	5	11,2	40,4	8,57

Обозначение смеси газов	Состав газовой смеси	Расход газа, л/мин	Потеря массы, %	R _f , %	Fe _{мет} , %
Окатыши 2					
B0	0% H ₂ + 30% CO + 70 %N ₂	5	27,0	18,46	5,9
B2	2% H ₂ + 30% CO + 68 %N ₂	5	26,5	16,68	3,5
B8	8% H ₂ + 30% CO + 62 %N ₂	5	31,5	20,58	3,7
B16	16% H ₂ + 30% CO + 54 %N ₂	5	36,5	24,47	4,4
B20	20% H ₂ + 30% CO + 50 %N ₂	5	35,0	23,76	7,1
Агломерат					
C0	0% H ₂ + 33% CO + 67% N ₂	3	10,2	31,0	5,1
C5	5% H ₂ + 30% CO + 65% N ₂	3	12,2	36,4	8,7
C10	10% H ₂ + 30% CO + 60% N ₂	3	12,8	37,9	11,4
C15	15% H ₂ + 30% CO + 55% N ₂	3	15,4	44,8	10,6
C20	20% H ₂ + 30% CO + 50% N ₂	3	14,8	38,5	11,2
C33	33% H ₂ + 0% CO + 67% N ₂	3	13,8	40,4	15,4

Анализ результатов исследований процессов восстановления агломерата и окатышей смесями восстановительных газов показал, что увеличение содержания водорода в смеси восстановительных и восстановительно - окислительных газов приводит к существенному увеличению содержания Fe_{мет.} в исследованных образцах и, в целом, повышает восстановимость железорудной шихты (таблица 5.2, рисунок 5.1).

Показатель восстановимости (R_f, %) по результатам исследований увеличивается в среднем на 2,5 - 3,0% с повышением концентрации водорода на каждые 5,0% в составе восстановительного газа. Для окатышей 1 с увеличением содержания водорода в смеси от 0 до 33% (смеси А0-А33) R_f увеличивается более, чем на 70% (отн.). Для агломерата степень восстановления в таких же условиях максимально увеличивается на 44,5% (отн.).

Содержание Fe металлического в окатышах после обработки восстановительным газом с высоким содержанием водорода увеличивается в 3,3 раза, а в агломерате в 2,0 раза (рисунок 5.2).

Аналогичные результаты были получены исследователями при сравнении начальной стадии процесса восстановления водородом агломерата и окатышей при температуре 900 °С [147]. Было обнаружено, что восстановление гематита водородом происходит быстрее, чем восстановление магнетита.

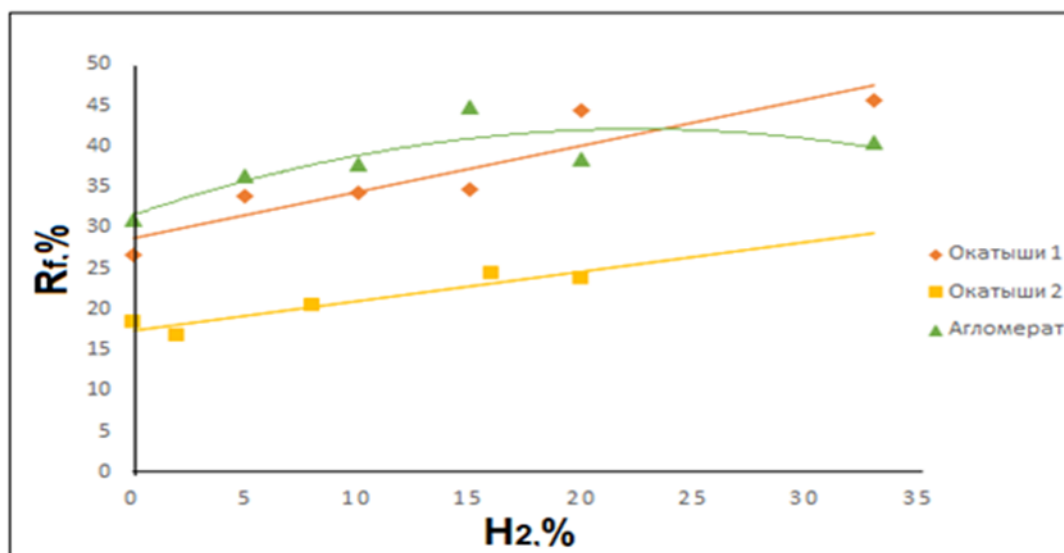


Рисунок 5.1 – Изменение степени восстановления (R_f , %) агломерата и окатышей (1,2) в зависимости от содержания водорода в восстановительной газовой смеси

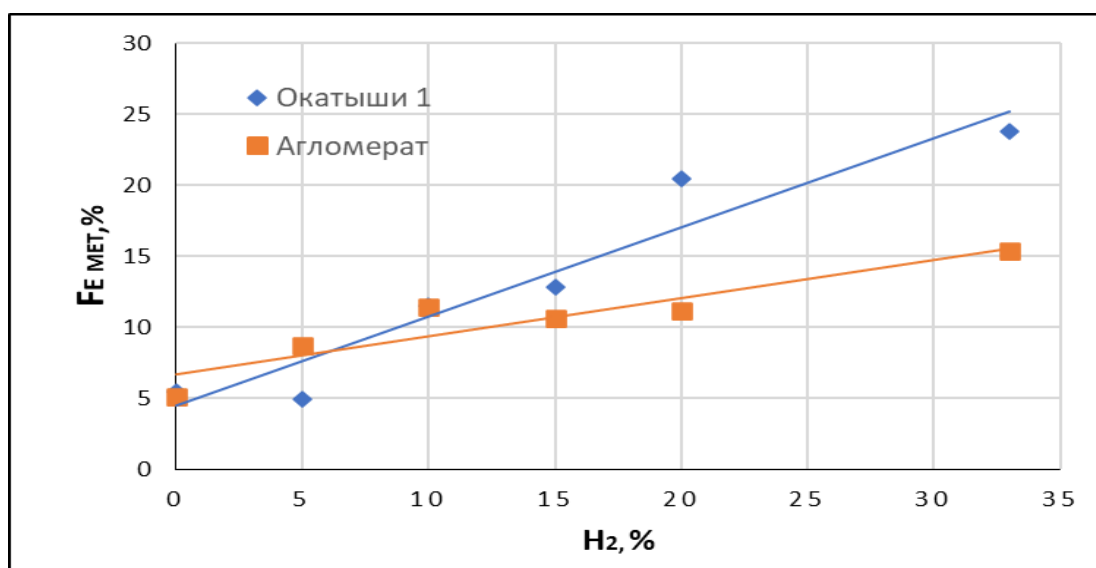


Рисунок 5.2 – Изменение содержания железа металлического ($Fe_{мет}$, %) в агломерате и окатышах (1) в зависимости от содержания водорода в восстановительной газовой смеси

Исследования ряда авторов [148, 149] показали, что при восстановлении гематита до магнетита из-за изменения объема образуются микротрещины. Образовавшиеся микротрещины работают как поры и облегчают диффузию водорода в объеме окатышей.

С кинетической точки зрения из-за атомного размера водорода и его высокой диффузионной способности H_2 является более быстрым восстановителем по сравнению с CO при температурах выше $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ [150]. При повышении содержания водорода в восстановительной смеси газов в большей мере ускоряется восстановление тех материалов, которые имеют большую пористость, а также число микропор недоступных для воздействия монооксидом углерода.

Диффузия водорода в агломерате может быть затруднена из-за образования плотной оболочки железа на стадии восстановления вюстита, содержание которого в агломерате достигает 12%. Исследователи [147] относят восстановление вюстита до железа металлического к стадии, контролирующей скорость всего процесса. Данные исследований авторов [151] показывают, что скорость превращение вюстита в железо уменьшается в интервале температур между 900 и $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ из-за замедления межкристаллитной диффузии твердой фазы через более плотный слой аустенита $\gamma\text{-Fe}$, (образующийся выше $912\text{ }^{\circ}\text{C}$), чем через слой феррита $\alpha\text{-Fe}$.

Появление в газовой смеси CO_2 приводит к понижению степени восстановления окатышей (см. таблицу 5.2). Сравнение результатов восстановления, а именно, показателя R_f для окатышей 1 восстановленных смесью газов без CO_2 (A10, A20) и смесью газов содержащих CO_2 с таким же количеством водорода (D10, D20) (рисунок 5.3) показывает, что в присутствии CO_2 в газовой смеси степень восстановления снижается в 1,20 (сравнение A10 и D10) и 1,56 раза (сравнение A20 и D20). Такое тормозящее влияние диоксида углерода на скорость восстановительных процессов, по мнению ряда исследователей [55, 119] объясняется разной степенью адсорбции газа – восстановителя и газообразных продуктов восстановления CO_2 и H_2O на поверхности восстанавливаемого оксида.

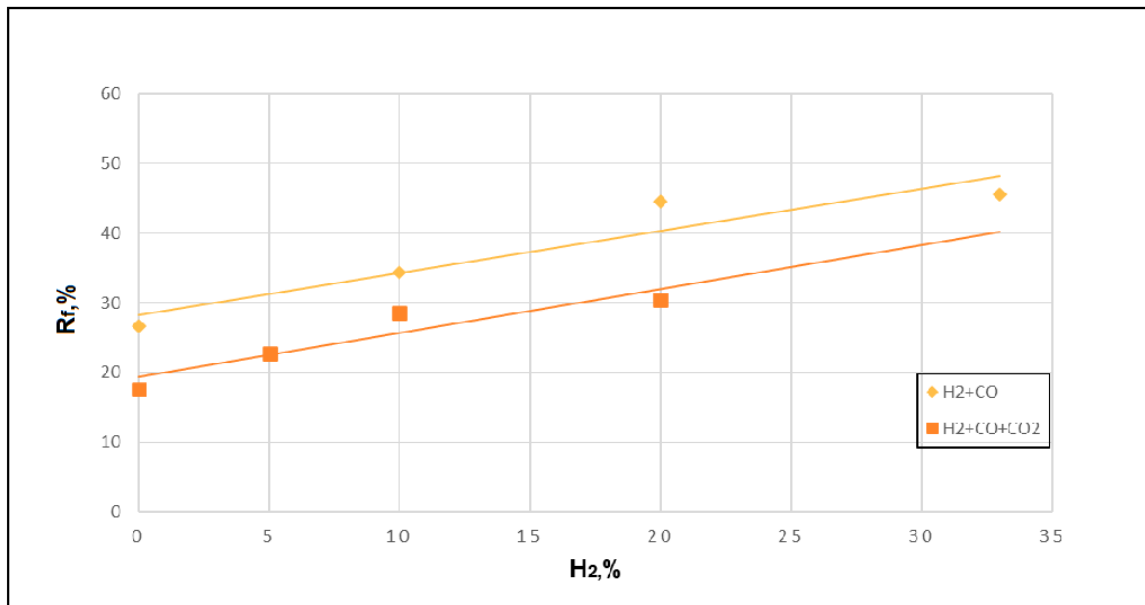


Рисунок 5.3 - Изменение степени восстановления (R_f , %) окатышей (1) после обработки смесью восстановительных (H_2+CO), и восстановительно - окислительных ($H_2+CO+CO_2$) газов с переменным содержанием водорода

Адсорбция последних выше, чем адсорбция H_2 и CO , что приводит к затруднению доступа восстановителей к поверхности оксида железа. Очевидно, по этой же причине в восстановленных в присутствии CO_2 образцах окатышей падает содержание железа металлического и степень металлизации (опыты с газовыми составами Д20-Д0), что хорошо видно на графиках рисунка 5.4.

Сравнительная оценка показателей металлизации железорудных окатышей (рисунок 5.4) полученных в лабораторных условиях при действии смеси восстановительных и окислительных газов (в присутствии CO_2) и показателей металлизации железорудных окатышей, полученных при действии смеси газов очищенных от CO_2 , показала, что наличие CO_2 при сопоставимом расходе восстановительных газов понижает степень металлизации $W = Fe_{мет.}/Fe_{общ}$ (%) в опытных образцах от 2,5 до 5 раз в зависимости от содержания водорода в смеси.

Общеизвестно, что увеличение расхода восстановительных газов ускоряет процесс восстановления. Причем, при небольших расходах скорость процесса восстановления прямо пропорциональна массовой скорости газа - восстановителя, поскольку в ходе восстановления газ успевает достигнуть равновесного состава.

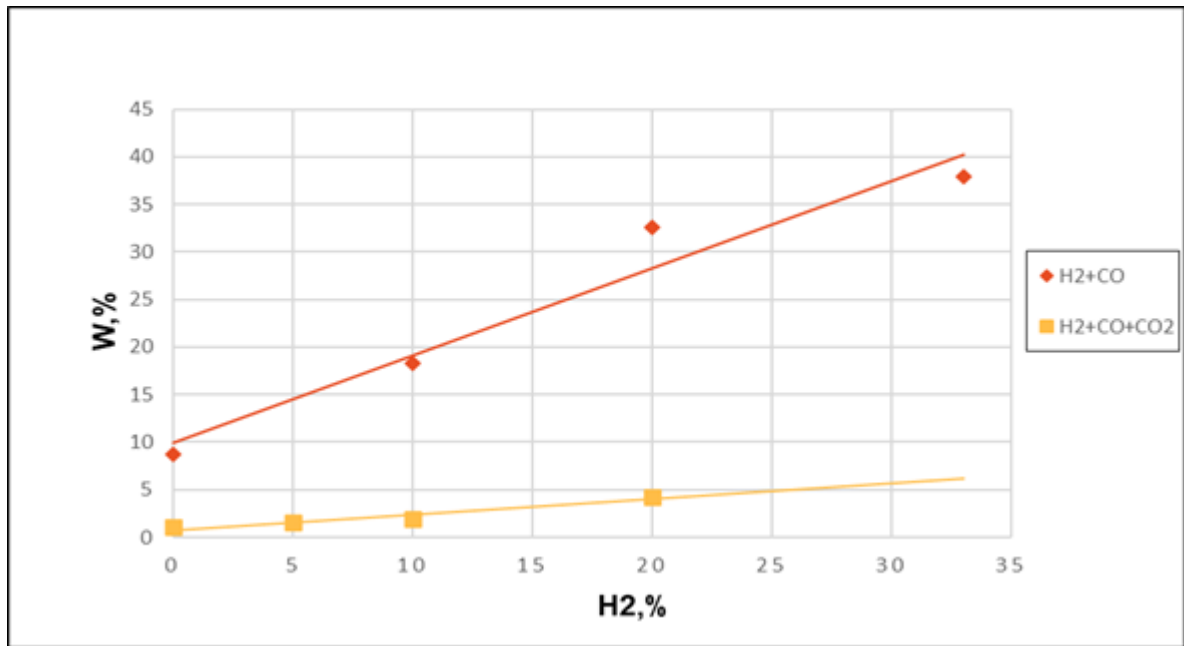


Рисунок 5.4 - Изменение степени металлизации (W, %) окатышей 1 после обработки смесью различных газов с переменным содержанием водорода

Кавасаки и др. отмечают [152], что существует критическая скорость газа, которая определяется экспериментально при различных температурах. Ниже критической скорости газа скорость потока газа контролирует скорость реакции. По данным лабораторных исследований (см. таблицу 5.2) увеличение расхода восстановительных газов в 1,67 раза приводит к увеличению степени восстановления с 20,2 % (смесь D5) до 32,5 % (смесь D20), при этом содержание $Fe_{мет.}$ увеличивается в 1,9 - 3,2 раза, соответственно.

В исследованиях Yi et al. было изучено [153] влияние соотношения количества CO и H₂ в восстановительной смеси на скорость восстановления железорудных окатышей при 850, 900, 950, 1000 и 1050 °C с изменением соотношения H₂/CO от 0,4 до 2,6. Установлено, что при увеличении диапазона отношения от 0,4 до 1,6 наблюдалось увеличение скорости восстановления, а изменение диапазона соотношения с 1,6 до 2,6 мало влияло на скорость восстановления. Это указывает на важность выбора правильного соотношения H₂/CO, а не просто увеличения содержания водорода. Так, при восстановлении агломерата наилучший результат по степени восстановления получен при

соотношении H_2/CO 1:2 (смесь С15). Интересно, что восстановление агломерата смесью С33 (таблица 5.2), где отсутствует CO , снижает степень восстановления по сравнению с наилучшим результатом, полученным при обработке смесью С15. В то же время для окатышей связь между увеличением водорода в смеси и повышением степени восстановимости является линейной. Таким образом окатыши лучше «отзываются» на повышение концентрации водорода в восстановительной смеси. Это нужно учитывать при выборе железорудной шихты для доменной плавки с увеличенным использованием ПГ.

Необходимо отметить хорошую сходимость результатов по уменьшению массы железорудных окатышей в процессе восстановления. Однако содержание $Fe_{мет.}$ и FeO в образцах полученных из параллельных экспериментов существенно различалось, несмотря на одинаковые условия проведения опытов и близкие условия охлаждения полученных образцов.

Лабораторные плавки агломерата и окатышей, восстановленных различными восстановительными газами, выявили, что во всех случаях по мере увеличения содержания водорода в восстановительном газе температуры полной потери газопроницаемости слоя и начала фильтрации жидких фаз растут (таблица 5.3, рисунок 5.5). При этом количество первичного шлака сокращается пропорционально увеличению содержания водорода в газовой смеси, что свидетельствует об увеличении количества металлического железа в образцах окатышей и агломерата. Из данных таблицы 5.3 видно, что приведенное к 100 г исходного образца содержание FeO в первичном шлаке уменьшается с увеличением содержания водорода в восстановительной смеси газов. На рисунке 5.6 представлены графики сокращения приведенного содержания FeO (%) в первичном шлаке окатышей в зависимости от количества водорода в восстановительной (H_2+CO) и восстановительно-окислительной ($H_2+CO+CO_2$) смеси газов. Повышение содержания водорода в восстановительной смеси газов до 20% при восстановлении окатышей приводит к уменьшению содержания $FeO_{пш}$ на 13,5 % (отн.), а в случае использования окислительно-восстановительной смеси наблюдается падение содержания $FeO_{пш}$ на 35 % (отн.).

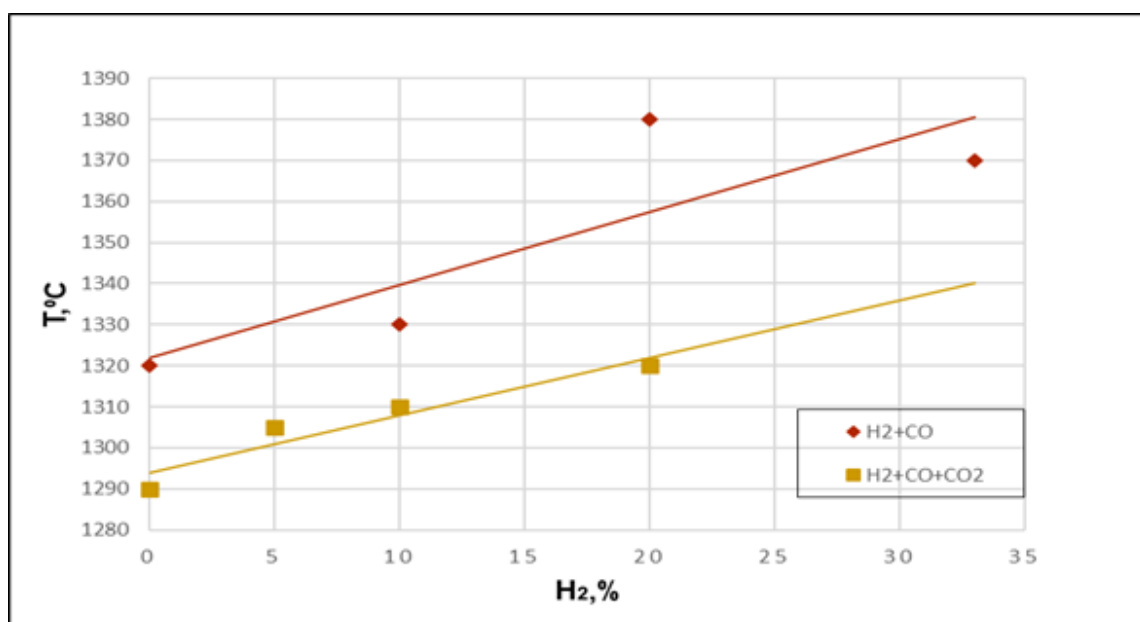


Рисунок 5.5 - Изменение температур начала фильтрации жидких фаз через коксовую насадку при проплавке окатышей (1), восстановленных смесью восстановительных (H_2+CO) и восстановительно - окислительных ($H_2+CO+CO_2$) газов в зависимости от содержания в них водорода

Таблица 5.3 - Результаты исследований процесса плавления восстановленных железорудных материалов

Составы газов	Температура, °C			Количество, первичного шлака, %	FeO _{пш} , %	Содержание FeO _{пш} приведенное к 100 г образца, %
	T _{пг}	T _{нф}	T _{махф}			
Окатыши 1 после восстановления						
A0	1280	1320	1430	28,4	36,7	10.4
A10	1290	1330	1440	26,8	35,4	9.5
A20	1320	1380	1420	24,2	37,2	9.0
A33	1290	1360	1450	23,8	38.2	9.1
D0	1260	1290	1400	43,2	48,7	21.0
D5	1255	1305	1400	41,8	42,4	17.7
D10	1270	1325	1410	40,6	40,8	16.5
D20	1270	1340	1400	37,0	36,9	13.7

Составы газов	Температура, °C			Количество, первичного шлака, %	FeO _{пш} , %	Содержание FeO _{пш} приведенное к 100 г образца, %
	T _{пг}	T _{нф}	T _{махф}			
Агломерат после восстановления						
C0	1320	1430	1510	11,6	9,2	1.07
C10	1320	1440	1480	12,8	8,8	1.12
C20	1315	1470	1490	9,8	7,2	0.71
C33	1290	1480	1500	10,2	7,6	0.77

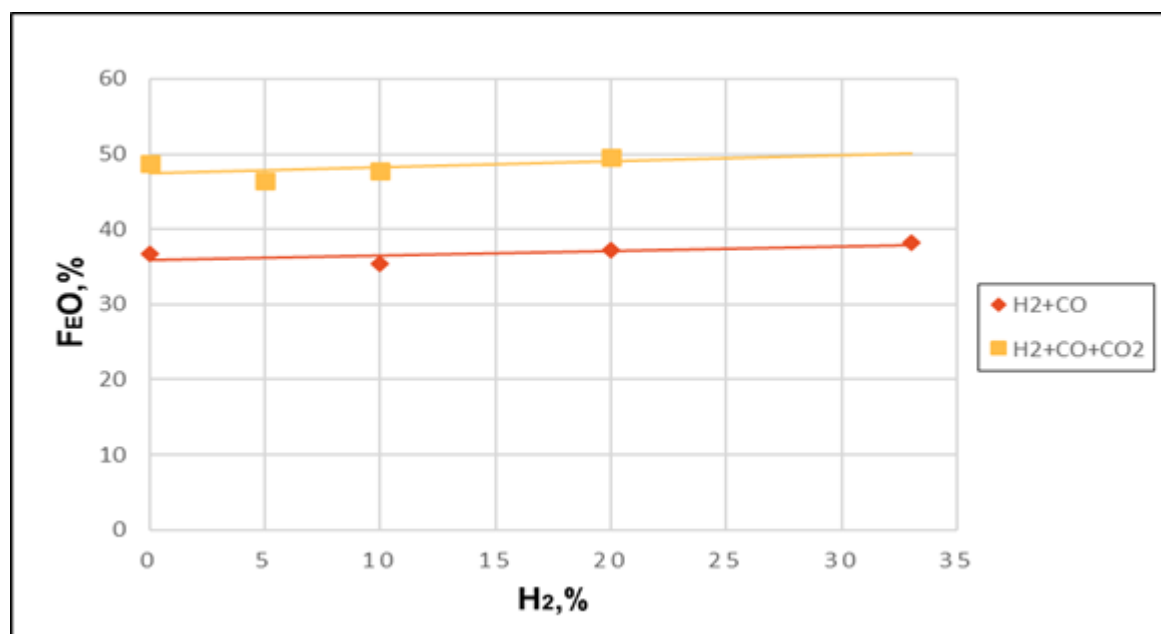


Рисунок 5.6 - Изменение содержания FeO (%) в первичных шлаках после проплавки окатышей (1) восстановленных смесью различных газов в зависимости от содержания в них водорода

При сравнении результатов восстановления агломерата восстановительной газовой смесью, не содержащей водород (C0) и содержащей H₂ без CO (C33) наблюдается уменьшение содержания FeO_{пш} на 28,0 % (отн.). Нужно отметить, что для агломерата и окатышей наилучшие результаты достигаются при соотношении H₂ и CO 1:1,5 в восстановительной газовой смеси. В этом случае для окатышей в первичном шлаке уменьшение содержания FeO достигает 13,5 % (отн.), а для

агломерата - 33,6 % (отн.), что подтверждает данные, полученные в [154] об оптимальном соотношении H_2 и CO в восстановительном газе.

Обобщая результаты лабораторных исследований, можно сделать 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.

Наличие в газовой смеси CO_2 существенно снижает восстановительный потенциал водородсодержащей смеси газов в области температур начала фильтрации жидких фаз. Повышение данного потенциала возможно в условиях обеспечения работы смеси восстановительных и окислительных газов в высокотемпературной зоне доменной печи.

5.3 Расчетно – аналитический прогноз технико – экономических показателей работы доменной печи в условиях увеличения количества природного газа и кислорода в дутье

Расчётно-аналитический прогноз показателей доменной плавки при содержании кислорода в дутье в пределах 30,0 - 35,0 % и по - шаговом увеличении количества ПГ в дутье от 140 м³/т до 260 м³/т чугуна проводили для различных шихтово - технологических условий ДП №2 в соответствии с методикой расчета материального и теплового балансов А.Н. Рамма [130].

В расчетах соотношение агломерата, окатышей, железной руды, сталеплавильного шлака и скрапа для печи задавали постоянным, содержание $Fe_{общ.}$ в шихте принимали равным 60,4 %; содержание кремния в чугуне - 0,4 %. Температуру дутья и колошникового газа задавали 1113 °С и 166 °С, соответственно. Химический состав железосодержащих материалов представлен в таблице 5.4. Часть результатов расчета характерных для условий работы доменной печи №2 объемом 1000 м³ представлена в таблице 5.5 и на рисунках 5.7 - 5.11.

Таблица 5.4 – Химический состав железосодержащих материалов

Компонент	Агломерат АГЦ – 2	Окатыши	Руда	Щебень сталеплав.	Скрап
Fe _{общ}	57,67	64,77	49,73	15,05	16,31
Fe ₂ O ₃	69,92	90,48	54,81	12,89	14,20
FeO	11,22	1,86	14,61	7,74	8,19
Fe _{мет}	0	0	0	8,43	13,78
SiO ₂	5,58	4,68	17,97	12,31	11,19
Al ₂ O ₃	1,11	0,50	5,09	2,94	2,59
TiO ₂	0,00	0,10	0,23	0,00	0,00
CaO	9,33	1,68	1,38	39,96	41,49
MgO	2,05	0,39	2,47	9,31	7,12

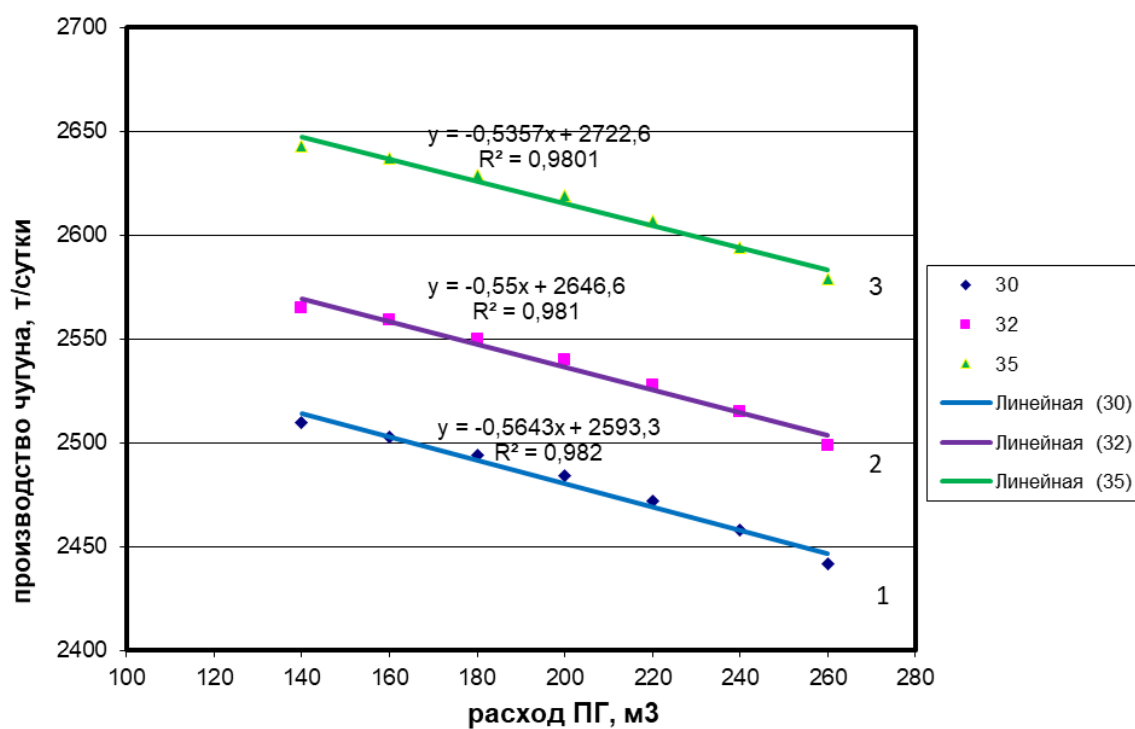


Рисунок 5.7 – Изменение суточного производства чугуна в зависимости от расхода природного газа и содержания кислорода в дутье:

ряд 1 – содержание O₂ - 30,0%; ряд 2 – содержание O₂ - 32,0%; ряд 3 – содержание O₂ - 35,0%

Таблица 5.5 – Результаты расчетного определения параметров доменной плавки на доменной печи объемом 1000м³ при увеличении расхода природного газа и содержания кислорода в дутье

Параметр	Содержание O ₂ , %													
	30,0							35,0						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Природный газ														
Расход, м ³ /т чугуна	140	160	180	200	220	240	260	140	160	180	200	220	240	260
Производительность, т/сут.	2510	2503	2494	2484	2472	2458	2442	2643	2637	2629	2619	2607	2594	2579
Расходы, кг/т чугуна														
Кокс	392,3	373,3	354,5	335,8	317,3	299,0	280,9	400,9	381,9	363,3	344,7	326,3	308,1	290,2
Агломерат	899,0	899,1	899,2	899,4	899,5	899,6	899,7	899,0	899,1	899,2	899,3	899,4	899,5	899,7
Окатыши	656,4	656,5	656,5	656,6	656,7	656,8	656,9	656,3	656,3	656,4	656,5	656,6	656,7	656,8
Руда доменная	24,2	24,2	24,2	24,2	24,2	24,2	24,2	24,2	24,2	24,2	24,2	24,2	24,2	24,2
Дутье														
Расход, м ³ /т чугуна	1095,4	1098,5	1101,9	1105,6	1109,6	11113,9	1118,6	971,2	974,1	977,2	980,5	984,2	988,1	992,2
Относительное изменение теоретической температуры горения, %.	0	- 4,37	- 8,53	-12,42	-16,18	-19,77	- 23,1	5,5	0,67	-3,85	-8,11	-12,2	-16,0	-19,6
Колошниковый газ														
Химсостав, %														
CO ₂	21,27	20,75	20,23	19,72	19,22	18,73	18,26	23,23	22,65	22,09	21,53	20,98	20,49	19,93
CO	24,68	24,07	23,47	22,88	22,30	21,74	21,18	26,95	26,28	25,63	24,98	24,34	23,72	23,12
H ₂	10,83	12,25	13,65	15,04	16,42	17,79	19,12	11,69	13,21	14,71	16,19	17,67	19,11	20,53
N ₂	43,22	42,94	42,65	42,35	42,05	41,74	41,44	38,12	37,85	37,58	37,29	37,00	36,71	36,42
Степень использования CO, %	46,29	46,29	46,29	46,29	46,29	46,29	46,29	46,29	46,29	46,29	46,29	46,29	46,29	46,29
Шлак														
Выход, кг/т чугуна	246,9	245,0	243,2	241,3	239,5	237,7	235,9	247,8	245,9	244,0	242,2	240,36	238,6	236,8
Основность 1	0,96	0,97	0,98	0,99	1,00	1,02	1,03	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	1,01	1,02
Основность 2	1,18	1,19	1,21	1,22	1,23	1,25	1,26	1,18	1,19	1,20	1,21	1,23	1,24	1,26

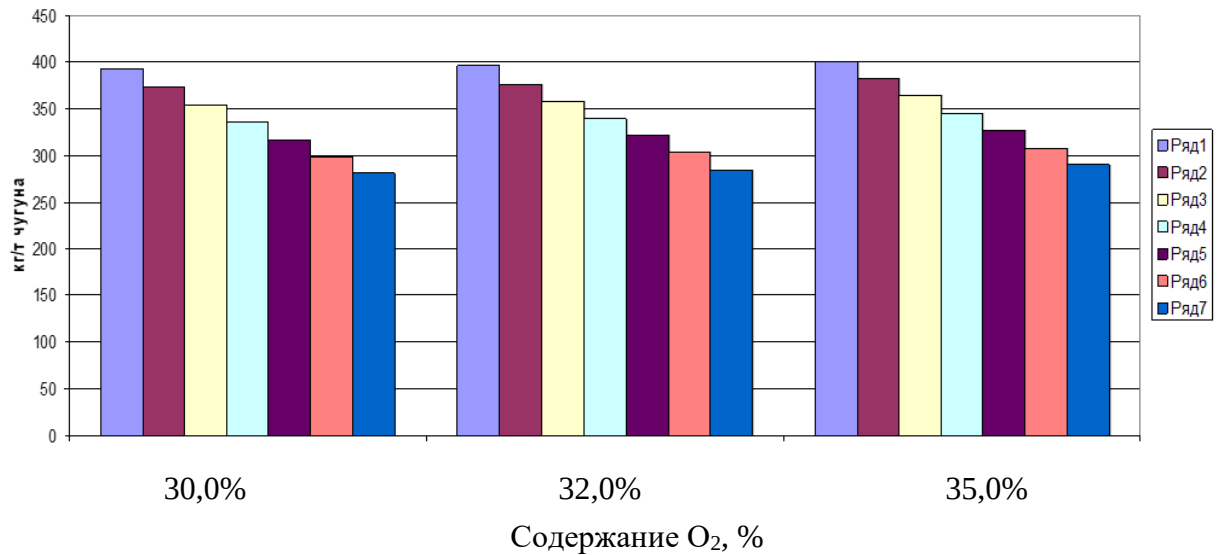


Рисунок 5.8 – Изменение расхода кокса в зависимости от расхода природного газа и содержания кислорода в дутье. Ряд - расход ПГ: 1- 140м³; 2- 160м³; 3- 180м³; 4- 200м³; 5- 220м³; 6- 240м³; 7- 260м³.Содержание O₂,%: 30,0; 32,0; 35,0

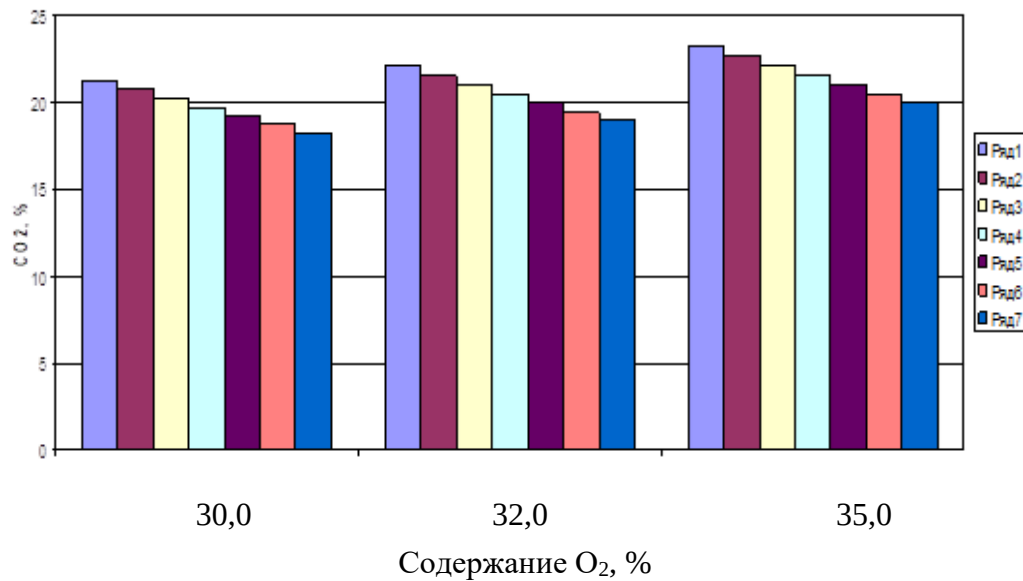


Рисунок 5.9 – Изменение содержания CO₂ в колошниковом газе в зависимости от расхода природного газа и содержания кислорода в дутье. Ряд - расход ПГ: 1- 140м³; 2- 160м³; 3- 180м³; 4- 200м³; 5- 220м³; 6- 240м³; 7- 260м³. Содержание O₂,%: 30,0; 32,0; 35,0

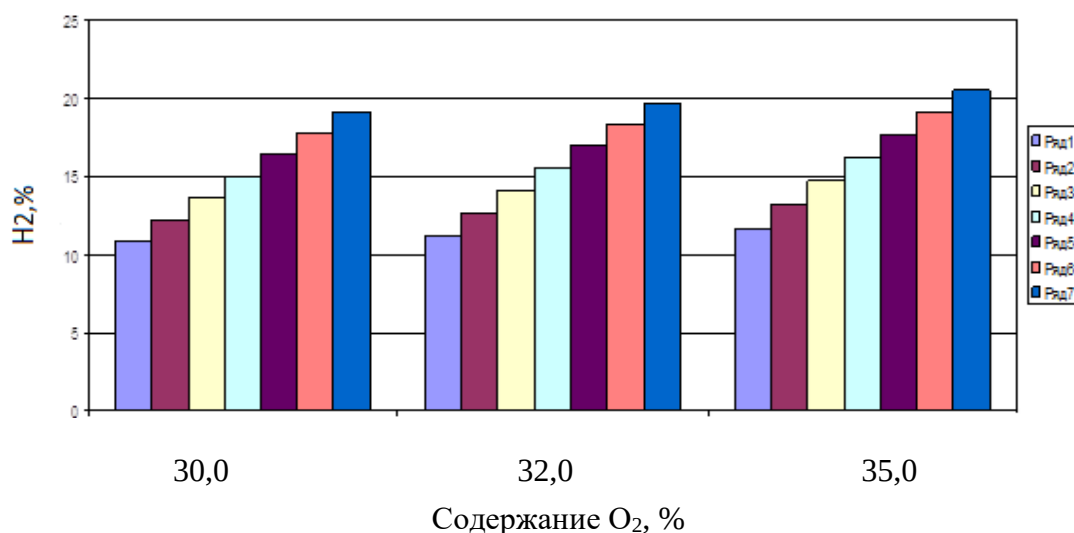


Рисунок 5.10 – Изменение содержания H_2 в колошниковом газе в зависимости от расхода природного газа и содержания кислорода в дутье. Ряд-расход ПГ: 1.140м³; 2.160м³; 3.180м³; 4.200м³; 5.220м³; 6.240м³; 7.260м³

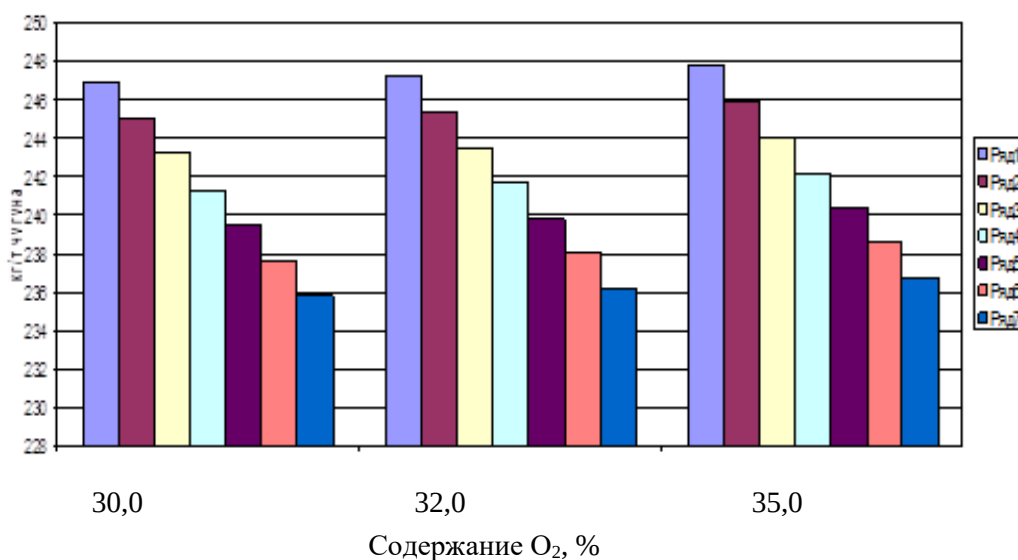


Рисунок 5.11 – Изменение выхода шлака в зависимости от расхода природного газа и содержания кислорода в дутье. Ряд - расход ПГ: 1. 140м³; 2. 160м³; 3. 180м³; 4. 200м³; 5. 220м³; 6. 240м³; 7. 260м³

Анализ результатов расчетов показал, что повышение расхода природного газа на каждые 10м³/т чугуна в диапазоне от 140 до 260 м³ при постоянном уровне содержания кислорода в дутье приводит к:

- снижению суточного объема производства на 0,11 - 0,34 %;
- сокращению расхода кокса на 2,3 - 3,0 %;
- снижению выхода шлака на 0,38-0,40 %;
- сокращение содержания CO_2 в колошниковом газе на 0,26 %;
- снижению теоретической температуры горения на 2,1 - 2,3 %.

Увеличение содержания кислорода в дутье с шагом в 1,0 % в пределах 30 - 35,0 % по данным расчетов при одинаковом расходе природного газа приводит к:

- увеличению суточного производства на 1,05 - 1,12 %;
- увеличению расхода кокса на 0,45 - 0,66 %;
- повышению теоретической температуры горения на 14 – 22 °С;
- повышению содержания CO_2 в колошниковом газе на 0,33 - 0,40 %.

Расчетами показано, что теоретический коэффициент замены кокса природным газом в соответствии с тепловым балансом в случае расхода природного газа в объемах от 140 до 200 - 220 м³/т чугуна находится в пределах 0,91 - 0,93 кг/ м³. Согласно отраслевой практике для шихтовых технологических условий работы доменных печей постсоветского периода коэффициент замены кокса природным газом при расходах 150 - 200 м³/т чугуна принят на уровне 0,6 кг/м³. Таким образом, теоретический расчет технико-экономических показателей доменных плавов с высоким расходом ПГ (210 - 230 м³/т чугуна) выявил наличие резерва для повышения эффективности его применения.

5.4 Опытнo-промышленное освоение технологии работы доменной печи с высоким уровнем расхода окатышей и природного газа

Отработку технологии выплавки чугуна в условиях высокой доли окатышей (до 90%) и повышенного расхода природного газа (свыше 200 м³/т чугуна) проводили на доменной печи №2 объемом 1033м³ в июне - августе 2021г.

Программа отработки технологии предусматривала следующие этапы работы по временным периодам:

1-й период: 15.06. – 28.06. Работа с повышенной концентрацией кислорода в дутье (до 33%), увеличение расхода ПГ до 160 - 170 м³/т чугуна, стандартная шихта;

2-й период: 29.06. – 04.07. Переход на использование окатышей основностью 0,9 ед. с долей в шихте ~80%, средний расход ПГ - 172,0 м³/т чугуна;

3-й период: 05.07. – 21.07. Работа на смеси окатышей основностью 0.55 и 0.9 ед., увеличение расхода ПГ до 210 м³/т чугуна;

4-й период: 22.07. – 02.08. Работа на окатышах новой партии основностью 0,9 ед., средний расход ПГ - 215 м³/т чугуна;

5-й период: 03.08. – 16.08. Выход из эксперимента, работа на стандартной шихте с долей окатышей ~40%, содержание кислорода в дутье - 31,8%, расход ПГ - 219,6 м³/т чугуна.

Усредненные показатели доменной плавки по периодам представлены в таблице 5.6.

Основной задачей **первого этапа** являлась подготовка условий для работы с повышенной долей окатышей и отработка технологии доменной плавки с пониженной теоретической температурой горения (ТТГ). Для минимизации влияния антрацита и мелкой фракции кокса на технико-экономические показатели работы доменной печи на время первого этапа они были выведены из шихты. В первом периоде массовая доля кислорода в дутье была увеличена с 30,3 до 33,0 %, при этом расход ПГ высокого давления на технологию увеличен в среднем на 15,0% и составил 165,2 м³/т чугуна. ТТГ понизилась с уровня 1960 °С до 1900 °С.

При профилактической стоянке доменной печи 23.06 произвели физическую оценку тотермана через фурменный прибор №11. Пика была забита вглубь печи на величину ~1,7 м дальше центра печи к противоположной стороне, что косвенно свидетельствует о нормальной дренажной способности горна.

Таблица 5.6 - Техничко-экономические показатели доменной плавки в базовом и опытных периодах

Показатель	Период					
	Базовый	1	2	3	4	5
Доля окатышей	38,7	39,9	81,5	78,3	75,0	40,2
Содержание Feобщ.	60,36	60,10	63,36	62,33	63,45	60,15
Расход ПГ, м ³ /т чугуна	143,1	165,2	172,3	207,5	214,4	219,6
Содержание 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	408,0	396,5	396,4	374,7	367,7	359,9
Условное топливо, кг/т	508,2	212,2	516,9	520,0	517,7	513,7
Выход колошниковой пыли	6,9	6,5	26,8	29,6	22,5	11,1
Дутье, м ³ / мин	1762	1816	1748	1769	1719	1755
ТТГ, °С	1950	1901	1888	1789	1732	1728
Температура чугуна, Т °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
Температура колошникового газа, °С	188,6	196,0	189,5	240,9	255,6	287,8
Температура периферии, °С	104,1	125,7	315,4	300,3	384,9	151,6
Температура футеровки шахты, °С	381,8	390,7	538,3	595,2	604,8	571,6
Выход колошникового газа, м ³	1496,4	1459,8	1473,3	1514	1523	1572

В первом этапе эксперимента повышение расхода ПГ на 22 м³/т чугуна 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/сутки.

Перед переходом ко **второму этапу**, в период с 24.06. до 28.06., долю текущих окатышей основностью 0,55ед. плавно увеличивали с 40 до 60 %.

Экспериментальные окатыши с основностью 0,9 ед. вводили в третью смену 28.06. Состав доменной шихты: 87 % - экспериментальные окатыши, 10 % - агломерат АГЦ-2 и 3,0 % флюсующая добавка – доломит Данковского месторождения.

С вводом в шихту экспериментальных окатышей возникли трудности с физическим прохождением трактов подачи. На складе ШПЦ 2 в месте выгрузки окатышей с основностью 0,9 ед. появилось искусственное образование в виде вытянутого конуса спрессованной мелкой фракции/пыли окатышей с углом откоса под 80 - 90 градусов и высотой несколько метров (фото на рисунке 5.12).



Рисунок 5.12 - Фото экспериментальных окатышей на ШПЦ 2 (30.06.21)

Также отмечалось зарастание перегрузочных узлов и увеличение в весовых воронках ДП №2 «мертвого» веса, что свидетельствовало о налипании материала

на стенки. Величина налипшего материала достигла ~7т в правой весовой воронке, после чего в цикл загрузки была введена обдирочная порция, состоящая из 10 т агломерата, что помогло постепенно убрать налипание. Вынос колошниковой пыли на ДП №2 увеличился с 6-7 кг/т чугуна до величины ~50 кг/т чугуна (за период 3 - 5 июля накоплено 435 т пыли).

Пробы экспериментальных окатышей, изученные в ЦИС, показали низкие прочностные характеристики как в исходном состоянии, так и при низкотемпературном восстановлении. По сравнению с окатышами основностью 0,55ед. прочность на сжатие у экспериментальных окатышей в среднем была ниже на 26 кг/окатыш (11 % отн.), доля окатышей с прочностью менее 50/100/150 кг/окатыш достигала 3,3/13,3/33,3%, соответственно.

При переходе на работу с ~80% окатышей в шихте ввиду неудовлетворительного качества окатышей основностью 0,9ед. недостаточная газопроницаемость слоя шихты не позволила обеспечить требуемый расход дутья (1748 м³/мин). Верхний перепад давления увеличился на 0,07 кгс/см² при увеличении выхода колошниковой пыли на ~20 кг/т. При этом часовой расход ПГ остался практически на уровне предыдущего периода, а удельный, за счёт сниженной интенсивности, увеличился до 172 м³/т чугуна. Увеличилась температура периферии и кладки шахты на 211°C и 156°C, соответственно. Дополнительный приход серы с окатышами привёл к увеличению серы в чугуне и шлаке на 0,022 и 0,53%, соответственно. Первая основность шлака снизилась до 0,98ед. Содержание марганца в чугуне при снижении его прихода с агломератом и вторичным сырьём снизилось до 0,17%. Доля кремния в чугуне увеличилась до 0,56 %, поскольку при отработке технологии пытались улучшать подвижность жидких продуктов плавки и повышать физическую температуру чугуна. Количество углерода в чугуне снизилось с 4,66 до 4,43 %. Общее снижение примесей чугуна составило 0,52 %. Содержание MgO в шлаке снизилось до 8,7 %. Для минимизации негативного влияния уменьшения содержания магния на шлаковый режим была проведена загрузка доломита в промежуточную зону.

Таким образом, работа ДП №2 **во втором периоде** с увеличенной долей окатышей в шихте была осложнена неудовлетворительным качеством экспериментальных окатышей. Увеличение до 90 % окатышей в шихте должно было обеспечить улучшение газопроницаемости столба шихтовых материалов в домне для облегчения пропускания увеличенного количества горновых газов, образующихся при сгорании на фурмах дополнительного природного газа. По факту окатыши с недостаточной прочностью ухудшили газопроницаемость. Выход колошниковой пыли на ДП №2 увеличился с базовых 6,9 кг/т до 29,6 кг/т (в максимуме до 50 кг/т чугуна).

В третьем периоде освоения технологии доменной плавки с высокой долей окатышей и повышенным расходом ПГ для минимизации негативного влияния низкопрочностных окатышей на работу доменной печи было проведено изменение состава железорудной части шихты, а именно: 40% окатышей основностью 0,9 ед, 40% окатышей основностью 0,5 ед. и 20% агломерата.

Работа на смеси окатышей позволила достичь расхода природного газа более 200 м³/т чугуна. Увеличенный на 64,4 м³/т расход природного газа обеспечил снижение расхода твёрдого топлива на 33,3 кг/т чугуна. ТТГ в результате была снижена до уровня 1789 °С или на 161 °С ниже базового периода. Производительность печи осталась на уровне предыдущего периода. Выход колошниковой пыли увеличился на 22,6 кг/т от базового значения. Сохранилась высокая температура периферийных термопар и кладки шахты – 300 и 595 °С, соответственно. Содержание водорода колошникового газа увеличилось до 14,9%.

В четвертом периоде опытно - промышленного освоения технологии доменной плавки с высоким расходом ПГ производили выравнивание хода доменной печи с использованием информационного инструмента для персонала печи в виде расчёта интенсивности работы печи, уровня расхода твёрдого топлива, ПГ и условного топлива.

Рудную нагрузку постепенно повысили до значения 4,51. Печь стала принимать дутьё, нагрев постепенно привели в норму.

В течение **пятого периода** после реализации экспериментальных окатышей основностью 0,9ед. и переводе доменной печи на традиционную для условий ПАО «Северсталь» шихту (~ 40 % окатышей КостГМК основностью 0,55 ед. и 60,0 % агломерата) расход ПГ сохранили на уровне 220 м³/т чугуна, при этом концентрацию кислорода в дутье поддерживали в пределах 32,0%. ТТГ снизилась на 220 °С по сравнению с базовым периодом и составила 1730 °С. Производительность чугуна в пятом периоде составила 2651 т/сут, что на 28 т/сут (на 1% отн.) ниже базового уровня.

Таким образом, опытно-промышленное опробование технологии доменной плавки с высоким уровнем расхода окатышей и расходом ПГ на ДП №2 в июне – августе 2021г. подтвердило теоретические предпосылки работы доменных печей с высоким расходом ПГ и показало обнадеживающие результаты:

- доля окатышей была увеличена с 38,7 до 75 – 82 %;
- расход ПГ увеличен с 143,1 м³/т чугуна до 219,6 м³/т чугуна или на 76,5 м³/т чугуна;
- расход твёрдого топлива сократили на 48,1 кг/т чугуна;
- коэффициент замены кокса ПГ за период работы с расходом ПГ более 200 м³/т чугуна и долей окатышей 65,2% составил 0,57 кг/м³;
- теоретическая температура горения за этот же период работы снизилась с базового уровня 1950 °С до 1800 °С;

В ходе опытно-промышленного опробования технологии доменной плавки с высоким уровнем расхода окатышей и расходом ПГ газа на ДП №2 выявлен ряд ограничивающих факторов, требующих дальнейшей оптимизации и сформулированы необходимые шаги для их преодоления:

- повышение прочностных характеристик окатышей в исходном состоянии и при низкотемпературном восстановлении;
- стабилизация качества кокса и его твердых заменителей (ИПУС, фракций 10 - 25 и 10 – 40 мм);
- модернизация воздушных фурм;

- корректировка режима загрузки, обеспечивающая центральный ход доменной печи.

5.5 Отработка технологии повышения расхода природного газа на доменных печах различного объема

Дальнейшая отработка технологии повышения расхода природного газа на доменных печах различного объема велась поэтапно, с учетом конструкции и технического состояния доменных печей. Всего можно выделить четыре значимых этапа, перечень которых с ключевыми достигнутыми результатами представлен в таблице 5.7 [154].

Таблица 5.7 - Этапы освоения технологии выплавки чугуна с увеличенным расходом природного газа

№	Период освоения	Этап	Основной достигнутый результат
1	Июль ÷ август 2021г.	Первые опыты на «малой» доменной печи №2 (полезный объем 1033м³).	Доказана практическая возможность эффективной работы доменной печи длительное время с уровнем (ТТГ) менее 1800°C и расходом природного газа более 200м³/т чугуна.
2	Сентябрь 2021г ÷ Декабрь 2022г	Отработка технологии на доменных печах №№ 1 и 2 с устойчивым режимом расхода ПГ 200 м³/т чугуна.	Достигнута устойчивая работа ДП №№ 1,2 с расходом твердого топлива 330÷360 кг/т чугуна и расходом природного газа 220÷240 м³/т чугуна.

№	Период освоения	Этап	Основной достигнутый результат
3	Сентябрь 2022г. ÷ Март 2023г	Адаптация технологии для ДП №4 (полезный объем 2700м³) и ДП №5 (полезный объем 5500м³).	Устойчивая работа ДП №№ 4 и 5 с расходом твердого топлива 360 - 350 кг/т чугуна и природного газа 160÷170 м³/т чугуна. Ограничение расхода ПГ на заданном уровне связаны с длительностью кампаний ДП №4 и ДП №5 (18 и 17 лет).
4	Август 2022г. ÷ Май 2023г.	Развитие технологии для ДП №3 (полезный объем 3200м³).	ДП №3 устойчиво работает с расходом кокса и природного газа 322 – 327 кг/т чугуна и 210÷215 м³/т чугуна, соответственно.

На каждом из этапов проводился анализ характеристик доменных процессов с целью выявления проблемных зон и «узких мест» технологии с высоким расходом ПГ как заменителя твердого топлива.

Основные ключевые проблемы, выявленные при освоении технологии замещения кокса природным газом, представлены ниже:

- потеря развитого осевого газового потока, увеличение температуры периферийных и колошниковых газов до уровня 400÷800°C и 250÷300°C, соответственно;
- резкие колебания теплового состояния печи, снижение температуры продуктов плавки, вплоть до нарушения графика выдачи чугуна;
- увеличение выноса колошниковой пыли и связанное с этим снижение стойкости засыпного аппарата и формирование в рабочем пространстве печей чрезмерного гарнисажеобразования, препятствующего правильной организации газового потока;

- повышенная чувствительность печей большого объема в переходных режимах к изменению химического состава железорудных материалов по шлакообразующим компонентам (MgO , TiO_2 , Al_2O_3 , щелочным элементам и ZnO).

Для предотвращения возникновения подобных отклонений был выполнен подбор рационального распределения железорудных материалов и кокса по сечению доменной печи с «подгрузкой» периферии и обеспечением требуемого раскрытия оси [155]. Кроме того, были разработаны циклические программы загрузки шихтовых материалов, предусматривающие на постоянной основе использование осевых порций кокса и промывочных подач.

Поиск путей снижения интегральной эмиссии диоксида углерода в процессах черной металлургии [156] требует разработки перспективных технологических решений по сокращению расхода твердого углеродного топлива в реконструируемых доменных печах. Для уточнения фактического распределения шихтовых материалов по сечению и высоте доменных печей после реконструкции был выполнен комплекс предпусковых исследований во время капитальных ремонтов 1-го разряда [157]. Следует отметить, что ключевым фактором успешного развития мало-шлаковой технологии доменной плавки с низким расходом твердого топлива является применение кокса стабильно высокого качества с показателями $\text{CSR} > 50\%$ и $\text{M}_{10} < 6 \%$.

Результатом развития технологии выплавки чугуна с увеличенным расходом ПГ, является тот факт, что удельный расход природного газа в целом по цеху производства чугуна (ЦПЧ) коксоаглодоменного производства ПАО «Северсталь» составляет более $190 \text{ м}^3/\text{т}$ чугуна при расходе твёрдого топлива менее $350 \text{ кг}/\text{т}$ чугуна. На рисунке 5.13 представлены удельные расходы твердого топлива и ПГ за период 2021÷2023гг.

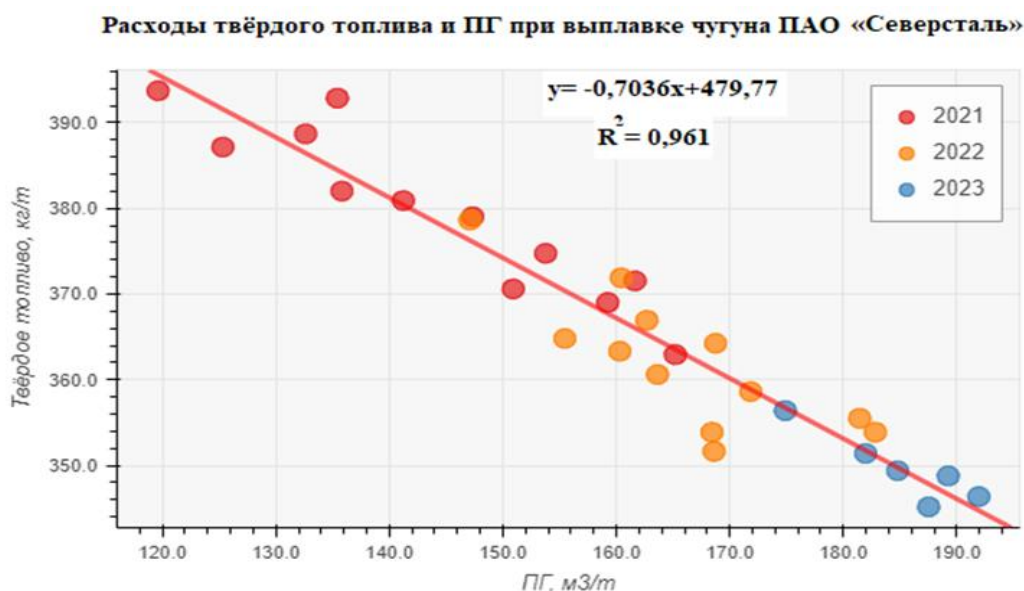


Рисунок 5.13 - Месячные удельные расходы твёрдого топлива и ПГ при выплавке чугуна ПАО «Северсталь» за 2021-2023 гг.

Коэффициент замены кокса природным газом составляет $0,704 \text{ кг/м}^3$ по данным трёхлетнего периода (2021÷2023 гг) освоения технологии. Это означает, что системное применение всех элементов технологии позволяет превышать указанные в справочной литературе [7] коэффициенты замены кокса природным газом для диапазона $151 \div 200 \text{ м}^3/\text{т}$ чугуна более, чем на 17 %.

Достигнутые удельные месячные расходы ПГ составляют:

- 220 - 240 $\text{м}^3/\text{т}$ для ДП №№ 1 и 2;
- 200 - 210 $\text{м}^3/\text{т}$ для ДП №3;
- 150 - 170 $\text{м}^3/\text{т}$ для ДП № 4 и ДП № 5;
- 191,9 $\text{м}^3/\text{т}$ по доменному цеху в целом.

Лучшие достигнутые месячные показатели по расходу твёрдого топлива составляют:

- 321,6 кг/т для ДП №1;
- 322,0 кг/т для ДП №3;
- 346,4 кг/т по доменному цеху в целом.

Необходимо отметить, что наиболее эффективное развитие технологии с использованием расхода природного газа более $200 \text{ м}^3/\text{т}$ чугуна достигнуто на ДП №3: расход природного газа свыше $210 \text{ м}^3/\text{т}$ чугуна, расход твёрдого топлива менее 325 кг/т чугуна.

Характерные зависимости изменения расходных показателей и технологических параметров доменной плавки при наращивании расхода природного газа для ДП №3 за период 2021÷2023 гг. представлены на рисунках 5.14 - 5.15.

Обработка значительного массива статистических данных о результатах работы отдельных доменных печей и всего цеха производства чугуна ПАО «Северсталь» в рамках замещения твердого углеродного топлива на более экологически и климатически безопасный природный газ при выплавке чугуна показывает существенные преимущества данного направления развития отечественной металлургии. Установленный факт превышения значения коэффициента замены кокса природным газом с учетом значимых факторов, влияющих на результаты плавки, величины 0,6 кг кокса/м³ ПГ для диапазона удельного расхода от 151 до 200 м³ открывает широкие перспективы для отечественных металлургов в завоевании лидирующих позиций в мире как по экономической эффективности производства чугуна с использованием природного газа, так и в сокращении климатического воздействия и выбросов парниковых газов [158].

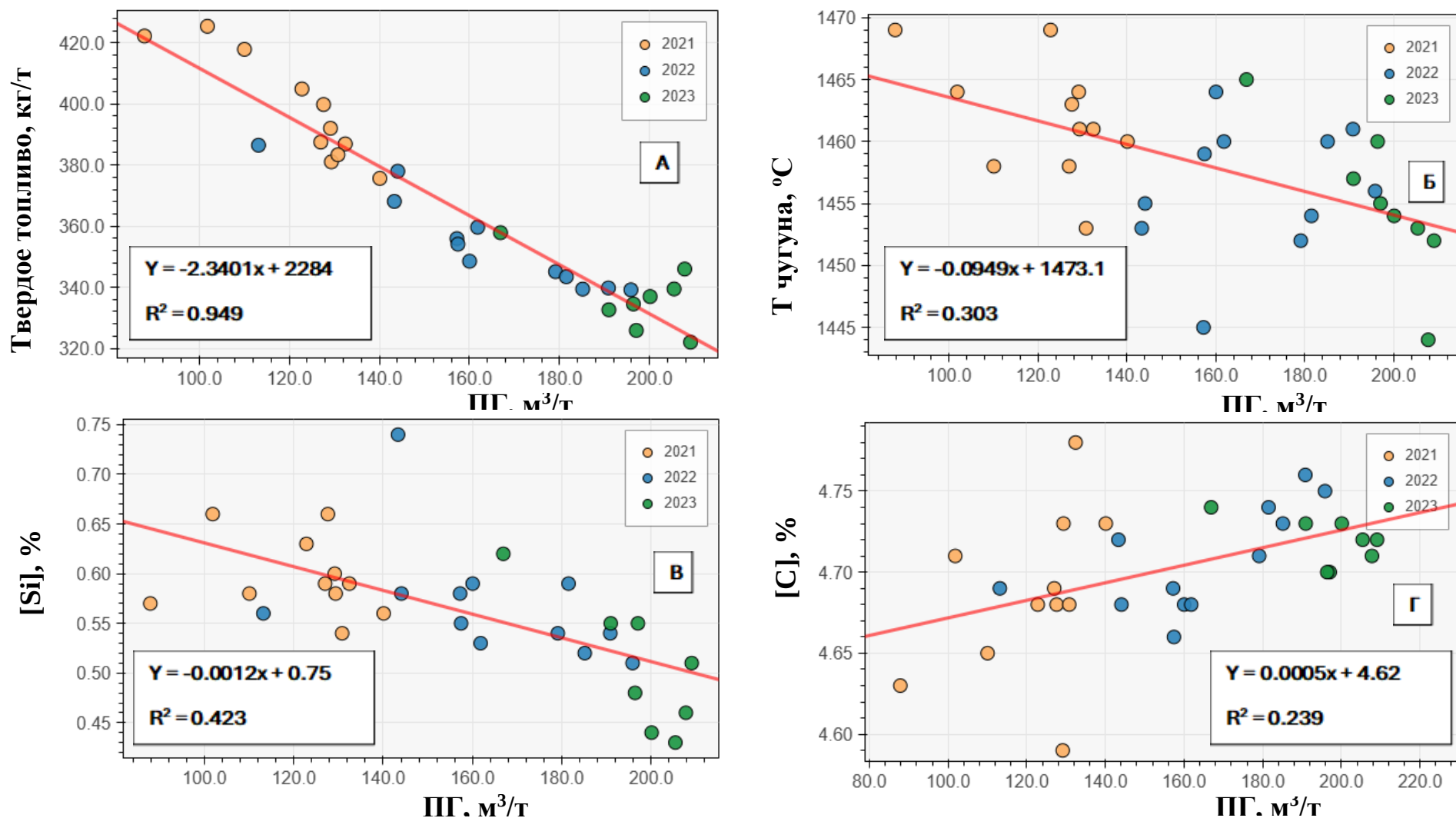


Рисунок 5.14 - Зависимость величин: А. расхода твердого топлива, кг/т; Б. температуры чугуна, °C; В. содержания [Si] в чугуне,%; Г. содержания [C] в чугуне,% от расхода ПГ м³/т чугуна в ДП №3 (по данным с 01.01.2020 по 31.08.2023)

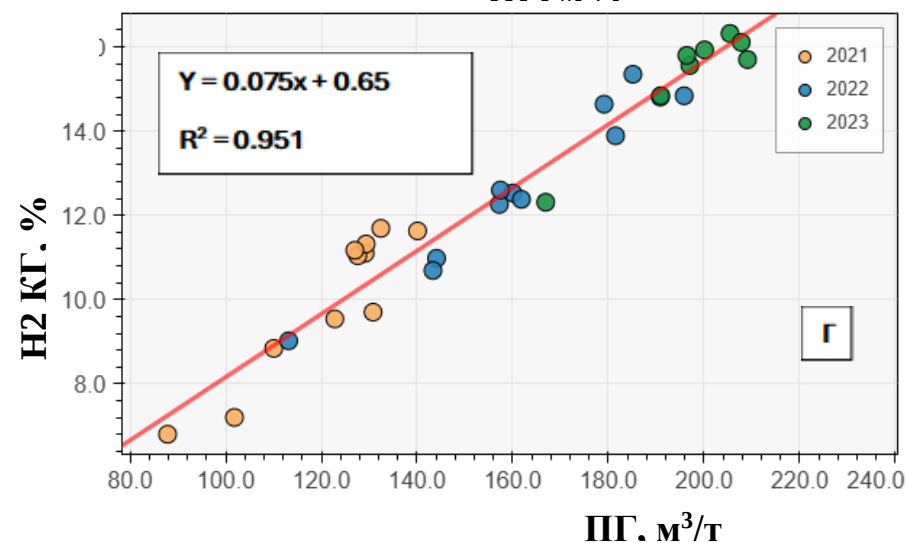
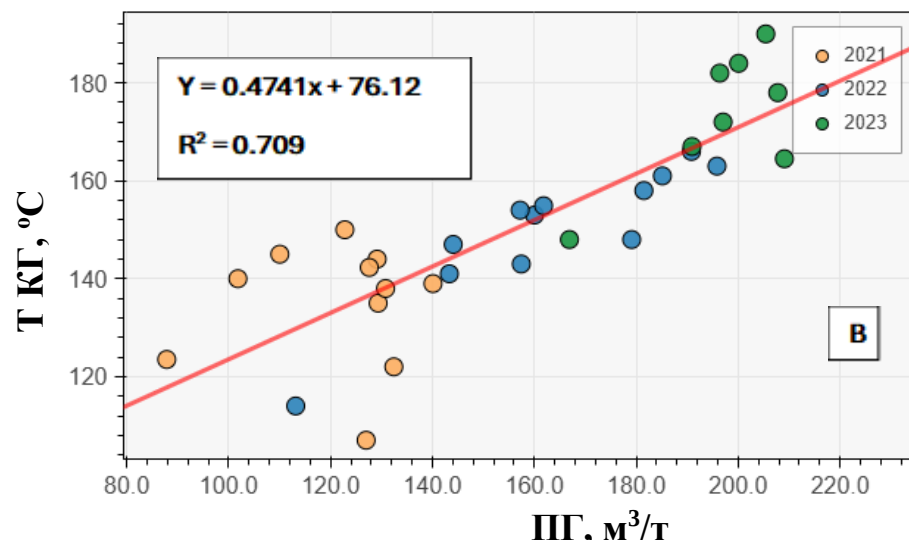
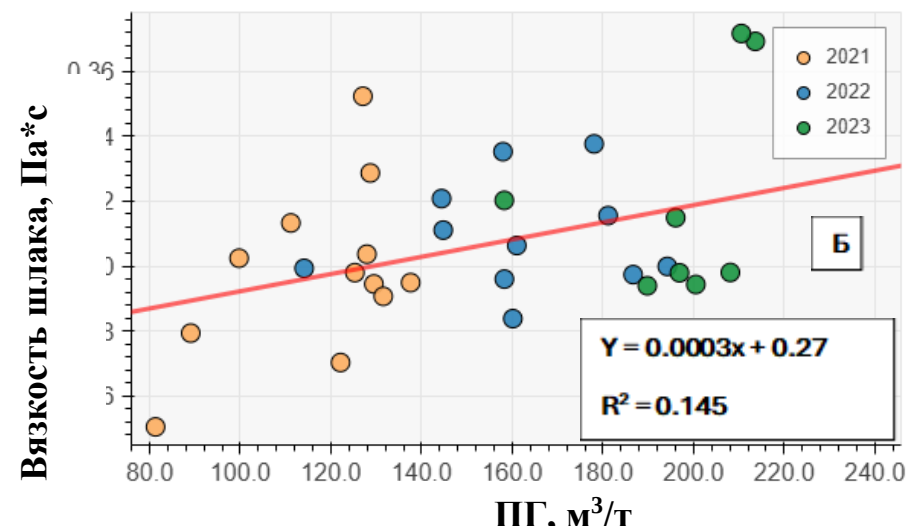
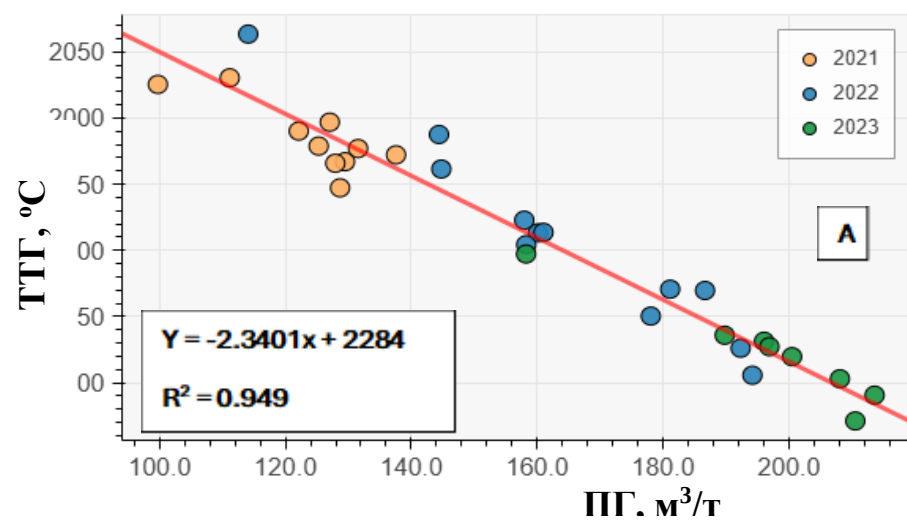


Рисунок 5.15 - Зависимость величин: А. ТТГ, °C; Б. вязкости шлака, Па·с; В. температуры колошникового газа, °C; Г. содержания Н₂ в колошниковом газе, % от расхода ПГ м³/т чугуна в ДП №3 (по данным с 01.01.2020 по 31.08.2023)

Внедрение комплекса мероприятий, представленных в данной работе, позволило в среднем по доменному цеху за период с 2014 по 2023 гг. снизить содержание углерода в чугуна на 0,10 % и сократить расход углерода при выплавке чугуна на 12,4 кг/т чугуна. При этом расход ПГ в среднем по доменному цеху увеличился на 77,9 м³/т чугуна, а удельный расход твердого топлива сократился на 65,9 кг/т чугуна (см. рисунки 5.16 – 5.17).

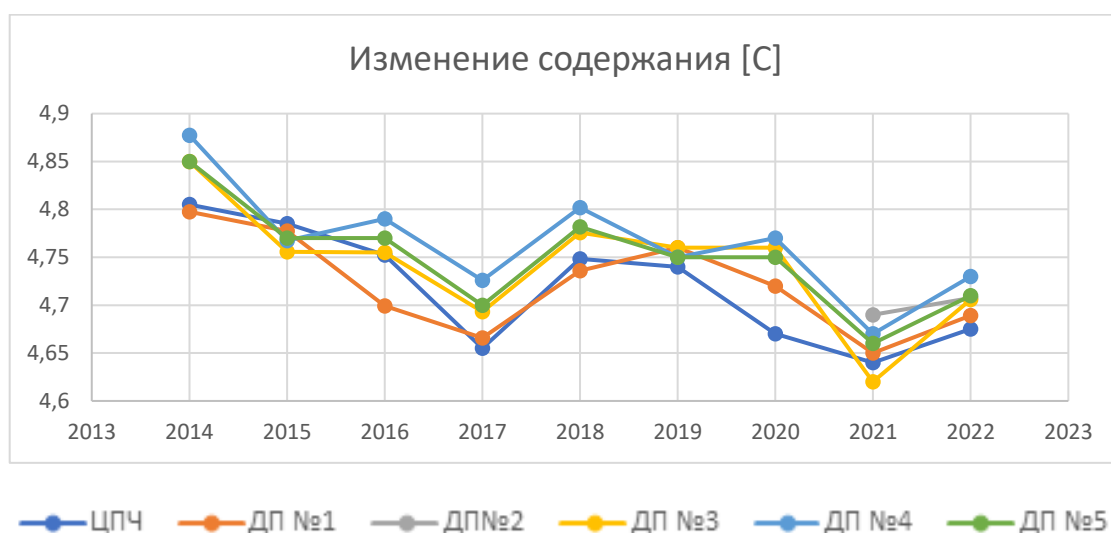


Рисунок 5.16 – Изменение содержания углерода в чугуна в доменном производстве ПАО «Северсталь» за период 2014 – 2023 гг.

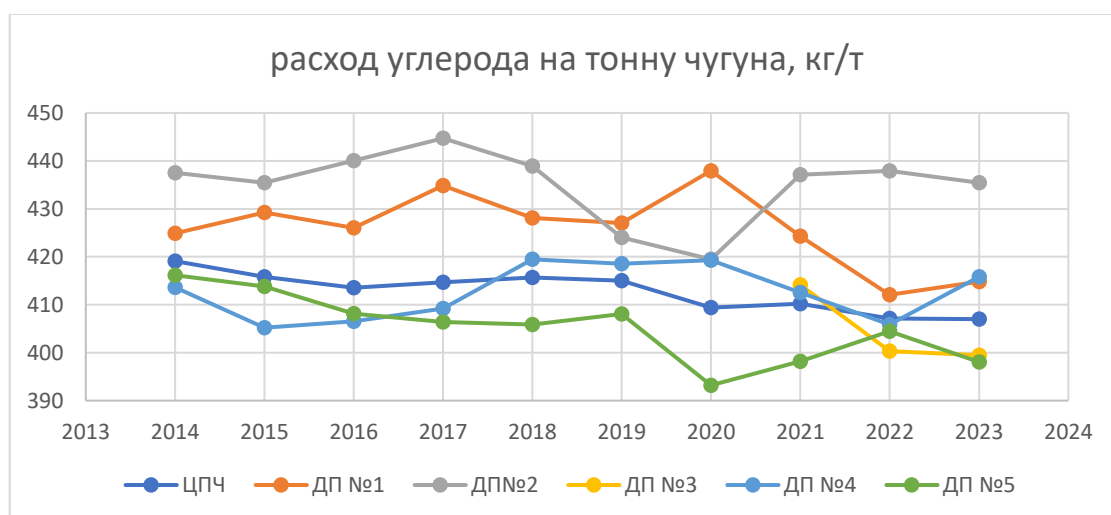


Рисунок 5.17 - Расход углерода на тонну чугуна в доменном производстве ПАО «Северсталь» в период 2014-2023гг

Обработка массива данных среднемесячных значений температуры чугуна, его химического состава и параметров газо-дутьевого режима плавки по каждой доменной печи отдельно и по всему цеху производства чугуна в целом за период с 2014г. по 1-й квартал 2026г., включительно, позволили установить фактическую взаимосвязь между содержанием углерода в чугуне и его температурой (Рис. 5.18).

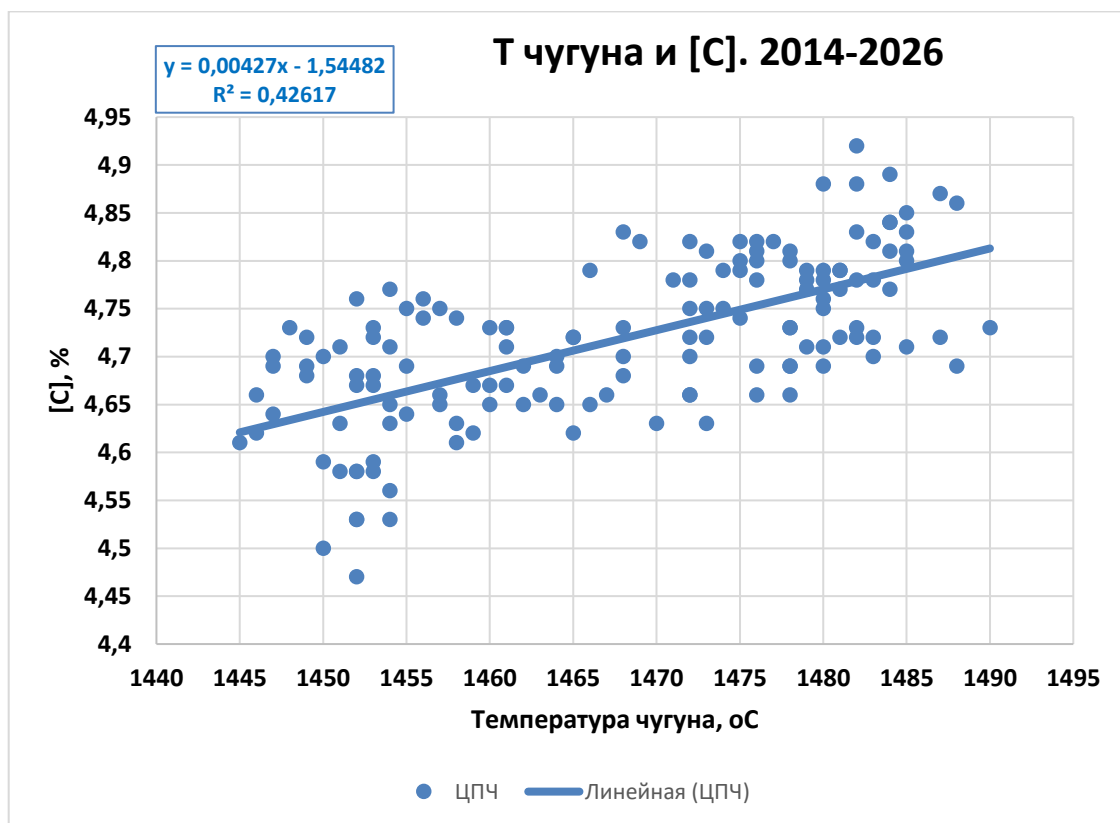


Рисунок 5.18 – Зависимость среднемесячного значения содержания углерода в чугуне от температуры чугуна в доменном производстве ПАО «Северсталь» в период 2014-2026гг.

Количество периодов работы цеха, участвующих в анализе составляет 147 месяцев. Вид полученной зависимости и анализ взаимосвязи температуры чугуна с изменениями газо-дутьевого режима ведения плавки позволяет утверждать, что снижения теоретической температуры горения, обоснованное увеличением удельного расхода вдуваемого природного газа на каждые $10 \text{ м}^3/\text{т}$ чугуна приводят к уменьшению температуры выплавляемого чугуна на $1,0^\circ\text{C}$ и сокращению содержания [C] на 0,005%. Таким образом, внедрение технологии повышения расхода природного газа на доменных печах приводит к сокращению количества удаляемого из чугуна в сталеплавильном переделе углерода и, как следствие, к сокращению расхода охладителя (известняка) в конвертерной плавке на 0,56 кг/т стали на каждые 0,01 % снижения [C] в чугуне.

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 не углеродное восстановление оксидов железа и электроплавку по мере удешевления «зеленого» водорода и «возобновляемой» электроэнергии [159].

Полученные результаты по уменьшению удельного расхода твердого топлива предполагают по логике металлургического процесса существенное повышение экологичности доменного и сталеплавильного передела. Серьезные исследования ряда авторов [156] по разработке методики расчета эмиссии диоксида углерода металлургическими предприятиями при оценке экологичности производства исходят из интегральности, т.е. суммарности эмиссии CO₂ на всем пути превращения руды и угля в металл. Снижение содержания углерода в чугуне позволяет уменьшить выбросы CO₂ в сталеплавильном производстве, а сокращение удельного расхода углерода при выплавке чугуна - снизить выбросы CO₂ в доменном процессе и таким образом существенно повлиять на общую эмиссию диоксида углерода в металлургическом производстве.

Выводы по разделу 5

1. Проведен анализ работы доменных печей с высоким уровнем расхода природного и коксового газа. Определено, что уровень водорода в горновом газе может достигать 20 – 22 %. Анализ опубликованных результатов о влиянии восстановительных газов с высоким содержанием водорода на физико-химические условия доменной плавки показал, что снижение удельного расхода кокса в этих условиях достигается за счет более интенсивной работы водорода по сравнению с окисью углерода в нижних горизонтах печи.
2. Определено лабораторными исследованиями влияние восстановительного газа с переменным содержанием водорода на характер восстановления агломерата и окатышей в «сухой» зоне доменной печи ($T \approx 950^{\circ}\text{C}$). Показано, что повышение в составе восстановительного газа водорода на каждые 5% при уровне CO = 30 % повышает восстановимость железорудного материала, в среднем, на 2,5 - 3,0 %. При высоком содержании водорода в восстановительном газе содержание Fe_{мет} в

окатышах выше, чем в агломерате, в среднем, на 15 – 20 % (отн.). Выявлено, что наличие в восстановительных смесях CO_2 снижает восстановительный потенциал газовой смеси.

3. Выявлено путем проведения лабораторной плавки агломерата и окатышей, восстановленных различными восстановительными газами, что с увеличением содержания водорода в восстановительном газе температуры начала фильтрации жидких фаз повышаются, масса первичного шлака и содержание FeO в нем уменьшаются.
4. Выполнен расчетно – аналитический прогноз технико – экономических показателей работы доменных печей различного объема в условиях повышения содержания кислорода (до 35,0%) и увеличения количества ПГ в дутье до 260 м³/т чугуна при переменном расходе окатышей.
5. Анализ расчетного эксперимента показал, что повышение расхода природного газа на каждые 10 м³/т чугуна в исследованном диапазоне при постоянном уровне содержания кислорода в дутье приводит к сокращению расхода кокса на 2,3 - 3,0 %, снижению суточного объема производства на 0,11- 0,32 % с теоретической температурой горения ниже 1700 °С, что может привести к сложностям при отработке продуктов плавки.
6. Проведено опытно-промышленное опробование технологии работы с высоким уровнем расхода окатышей и природного газа на доменной печи течении длительного периода с расходом природного газа 200 м³/т чугуна и уровнем теоретической температуры горения 1750 °С.
7. Разработан комплекс приемов и мер в технологии малошлаковой доменной плавки, обеспечивающий коэффициент замены твердого топлива природным газом выше 0,7 кг/м³ при его расходах в пределах 151 - 210 м³/т чугуна.
8. 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 выплаваемого чугуна на $1,0^{\circ}\text{C}$ и сокращению содержания [C] на 0,005%.

9. Внедрение комплекса мероприятий, связанных с повышением качества железорудных материалов и кокса, увеличением коэффициента замены кокса природным газом позволило:

снизить содержание углерода в чугуне на 0,10 %, что соответственно уменьшило выбросы CO_2 в сталеплавильном производстве;

сократить расход углерода при выплавке чугуна на 12.4 кг/т чугуна, что снизило выбросы CO_2 в доменном производстве.

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 CO_2 .

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°С 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 чугуне 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.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АГЦ	агломерационный цех
БЗУ	бесконусное загрузочное устройство
ЖРМ	железорудные материалы
ЖРС	железорудное сырье
ДП	доменная печь
КАДП	коксо-аглодоменное производство
КЗУ	конусные загрузочные устройства
МК	металлургический комбинат
ММК	Магнитогорский металлургический комбинат
ПГ	природный газ
ПУТ	пыле-угольное топливо
ЦГОК	Центральный горно-обогатительный комбинат
ЦИС	центр испытания сырья
ЧерМК	Череповецкий металлургический комбинат
ШПЦ	Шихто-подготовительный цех

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Development of Strategy for Sustaining, Enhancement and Cost Reduction at Severstal's Primary End/ E. Vinogradov, A. Kalko, S. Chikinov [et al.] /AISTech 2020 — Proceedings of the Iron & Steel Technology Conference. USA, Cleveland, 31.08-3.09.2020. - P. 178-186.

2, Повышение эффективности работы коксоаглодоменного производства ПАО «СЕВЕРСТАЛЬ». Научно-технический прогресс в черной металлургии. Материалы II международной научно-технической конференции (7-9 октября 2015 г.) / Е. Н. Виноградов, А. А. Калько, Е. А. Волков [и др.]//Отв. ред. А. Л. Кузминов. – Череповец: ФГБОУ ВПО «Череповецкий государственный университет». - 2015. - 280 с.

3 Практика освоения технологии коксования трамбованной угольной загрузки череповецким металлургическим комбинатом с использованием собственных технологических и технических решений/ А. А. Калько, С. В. Чикинов, Е. В. Карунова, О. А. Калько//Кокс и химия. - 2023. - №5. - с. 19 - 23.

4 Замещение кокса природным газом для снижения расхода твердого топлива на традиционных доменных печах/ Е. Н. Виноградов, А. А. Калько, С. В. Чикинов [и др.]// «НДТ в черной металлургии». Производство чугуна и стали: материалы 5-й международной промышленной конференции. – Москва (11-13 октября).

5 Опытная плавка с уменьшенным выходом шлака/ Н. Н. Бабарыкин, А. Л. Галатонов, И. И. Сагайдак [и др.] //Сталь. - 1964 - №12. – С.1069 - 1079.

6 Оптимальная основность агломерата и окатышей / И. А. Копырин, Ю. М. Борц, Е. Н. Ярхо [и др.] // Черметинформация. – 1972 – сер. 3. – вып. 4 – 27с.

7 Волков, Ю. П. Технолог-доменщик. Справочное и методическое руководство/ Ю. П. Волков, Л. Я. Шпарбер, Ф. К. Гусаров // Москва: "Металлургия", 1986. - 263с.

8 Ефименко, Г. Г. Состояние, проблемы, перспективы железорудной промышленности и производства окускованного металлургического сырья / Г. Г. Ефименко, Н. В. Игнатов, Д. А. Ковалев // Труды международного конгресса доменщиков. Днепропетровск – Кривой Рог. - 1999. - С. 18 -30.

9 Yasumoto, K. The effect of SiO_2 amount and basicity on the properties of sinter/ K. Yasumoto, K. Ono, K. Yamamoto// Transactions. – 1981. - V. 21. - № 9. - P.384-387.

10 Rokugawa, S. Production of high quality sinter for blast furnace burdens aiming the high pulverized coal rate operation / S. Rokugawa, H. Noda, K. Ichikawa // Rev. met. (France). –1999. – V.96, №10 – С 1181 – 1190.

11 К вопросу об оптимизации основности агломерата и окатышей/ А. С. Нестеров, И. Х. Балмагамбетов, Н. А. Гладков [и др.] // Сталь. – 1989. - №11. – С. 4 -9.

12 Гладков, Н. А. Процессы в слое железорудных материалов при его нагревании/ Н. А. Гладков, А. С. Нестеров // Металлы. – 1987. - №3. – С. 9 -11.

13 Коробов, И. И. Исследование работы доменных печей на разном количестве окатышей в шихте/ И. И. Коробов, В. Н. Ковшов // Metallurgia и коксохимия. – Киев: «Техника». – 1975. - № 43. – С. 3 - 8.

14 Гладков, Н. А. Изменение металлургических свойств агломерата и окатышей при ступенчатом восстановлении / Н. А. Гладков, Н. А. Гребенкин, В. Н. Никифоров // Интенсификация процессов доменной плавки и освоение печей большого объема: темат. отрасл. сб. – М. : «Металлургия», 1979. – № 5. – С. 16-20.

15 Можаренко, Н. М. Тенденции изменения проектных профилей доменных печей в современных топливно-сырьевых условиях/Н. М. Можаренко, Е. Д. Вышинская, В. В. Горупаха //Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. - 2017. - Вып. 27. – С. 40-52.

16 Лозович, А. В. Влияние рудной нагрузки на степень косвенного восстановления в доменной печи / А.В. Лозович, С.О. Джимо, С.А. Загайнов // Инновации в материаловедении и металлургии. Материалы IV Международной интерактивной научно-практической конференции. – Екатеринбург. – 2015. – С. 24-28.

17 Yaniga, S. E. 100 Percent Pellet Burden Trial on Gary Works No.13 Blast Furnace /S. E. Yaniga, A. L. Mead, P. W. Francis // Proceedings conference ISSTech (Indianapolis, USA, April 27-30, 2003) – Vol. 1. – P. 163-173.

18 All pellets operation on Kobe No.3 blast Furnace under intensive coal injection /K. Ito [et al.] // Proceedings 3-d International Conference Science and Technology

Ironmaking, 16 - 20.06.2003, Düsseldorf (Germany). – Düsseldorf: [б.и.], 2003. –Р. 430 - 436.

19 Investigation of the simultaneous injection of charcoal and coal into the blast furnace raceway by the 3D multiphase model / J. A. Castro [et al.] // Proceedings 6th International Congress on the Science and Technology of Ironmaking, 14-18.10.2012, Rio de Janeiro (Brazil). – 2012. – Р. 165-168.

20 Геердес, М. Введение в современный доменный процесс / М. Геердес, Х. Токсопуес, К. Влит; пер с англ. И.Ф. Курунова. – Липецк: НЛМК, 2010. – 200 с.

21 Gosh, A. Ironmaking and Steelmaking: Theory and Practice / A. Gosh, A. Chatterjee. – New Dehli (India): Prentice-Hall of India Pvt.Ltd, 2008. – 472 p.

22 О работе доменных печей с высокой долей окатышей в шихте / А. В. Павлов, О. П. Онорин, Н. А. Спирин, И. Е. Косаченко // Metallurg. - 2016. - № 6. - С. 145–154.

23 Яковлев, Ю. В. Опыт применения окатышей для выплавки чугуна на ММК в 1965 - 1980 гг. / Ю. В. Яковлев, Н. Н. Бабарыкин, Б. А. Марсуверский // Сталь. - 1982. - №1. - С. 4-10.

24 Исследование действия расхода окатышей на стойкость футеровки доменной печи / С. К. Сибгатуллин, А. С. Харченко, Е. О. Харченко [и др.] // Литейные процессы. - 2015. - № 14. - С. 59-67.

25 Плискановский, С. Т. Работа доменных печей с применением окатышей ЦГОКа / С. Т. Плискановский, А. А. Шокул, Д. В. Гулыга // Metallurg. – 1972. – № 12. – С. 4–6.

26 Отработка технологии выплавки чугуна в доменной печи АО "Уральская сталь" объемом 1232 м³ с долей окатышей Михайловского ГОКа в шихте 95 % / И. Ф. Исаков, Г. А. Куницын, Д. В. Лазарев [и др] // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2021. – Т.77, №7. – С. 768-775. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2021-7-768-775>.

27 Дема, Р. Р. Влияние расхода окатышей различной основности на показатели доменной плавки/ Р. Р. Дема, А. Н. Шаповалов, С. Н. Басков // Черные металлы. - 2021. - № 1. – С. 4 - 10.

28 Анализ возможных путей снижения содержания серы в чугунах / С. В. Мясоедов, С. В. Филатов, В. В. Пантелеев, В. С. Листопадов, С.А. Загайнов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. - 2020. – Т. 63, № 11-12. - С. 878 – 882.

29 Исследование металлургических свойств окатышей и особенностей их использования / В. И. Большаков, Н. А. Гладков, Г. И. Орел, П. И. Оторвин // Сталь. – 2004. – № 10. – С. 6–12.

30 Структура и разрушение окатышей при восстановлении / Л. Ф. Алексеев, В. А. Горбачев, Д. З. Кудинов, С. В. Шаврин. – М.: Наука, 1983. – 78 с.

31 Тарасов, В. П. Теория и технология доменной плавки / В. П. Тарасов, П. В. Тарасов. – М.: Интермет Инжиниринг, 2007. – 384 с.

32 Опытные плавки с изменением в доменной шихте ММК доли неофлюсованных окатышей ССГОК от 0 до 100 % /З. И. Некрасов, Н. А. Гладков, Ю. В. Яковлев [и др.] // Сталь. – 1978. – № 1. – С. 11-18.

33 Изменение порозности многокомпонентной доменной шихты при размягчении / А. А. Томаш, В. П. Тарасов, В. Б. Семакова, А. В. Зотов // Вестник Приазовского государственного технического университета, сер.: Технические науки: Сб. науч. трудов. – Мариуполь: ПГТУ. - 1999. – Вып. 8. – С. 9-14.

34 Товаровский, И. Г. Анализ показателей и процессов доменной плавки / И. Г. Товаровский, В. В. Севернюк, В. П. Лялюк. – Днепропетровск: Пороги, 2000. – 420 с.

35 Журавлев, Ф. М. Окатыши из концентратов железистых кварцитов / Ф. М. Журавлев, Т. Я. Малышева. - М.: Металлургия, 1991. - 127 с.

36 Гладков, Н. А. Об эффективности использования окатышей в доменном производстве в странах - членах СЭВ / Н. А. Гладков, Н. И. Савелов, А. Г. Ульянов // Сталь. - 1982. - № 12. – С.13-18.

37 Структура и разрушение окатышей при восстановлении / Л. Ф. Алексеев, В. А. Горбачев, Д. З. Кудинов, С. В. Шаврин. — М.: Наука, 1983. - 78 с.

38 Никифоров, В. Н. Особенности работы доменных печей на окатышах в связи со спецификой их металлургических свойств // Автореф. дис. канд. тех. наук. — Днепропетровск, 1983. - 20 с.

39 Маерчак, С. Производство окатышей / С. Маерчак. - М.: Metallurgy, 1982. - 127 с.

40 О работе доменных печей с высокой долей окатышей в шихте / А. В. Павлов, О. П. Онорин, Н. А. Спирин [и др.] // Современные научные достижения металлургической теплотехники и их реализация в промышленности : сб. докладов международной научно-практической конференции «Современные научные достижения металлургической теплотехники и их реализация в промышленности». — Екатеринбург : УрФУ, 17–18 сентября 2015. — С. 145-154.

41 О некоторых вопросах применения окатышей в существующих условиях доменной плавки / А. В. Дидевич, Н. И. Храпко, З. И. Либерова [и др.] // Донбасс-2020: «Наука и техника – производству»: материалы IV научно-практической конференции. - Донецк, 03-04 февраля 2004. - С. 227 - 231.

42 Товаровский, И. Г. Совершенствование и оптимизация параметров доменного процесса. — М.: Metallurgy, 1987 - 192 с.

43 Анализ путей повышения энергоэффективности выплавки чугуна в доменных печах НЛМК / С. В. Филатов, С. А. Загайнов, Л. Ю. Гилева [и др.] // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2017. Т. 60, № 8. - С. 637 – 642.

44 Товаровский, И. Г. Познание процессов и развитие технологии доменной плавки. — Днепропетровск: Журфонд. — 2015. - 912 с.

45 Товаровский, И. Г. Принципы оптимизации дутьевого режима группы доменных печей/ И. Г. Товаровский, В. И. Хомич // Metallurgy and coke chemistry. — Киев: Техника, 1982. - № 75. - С. 49, 57.

46 Математические модели оптимального использования ресурсов в доменном производстве / А. В. Бородулин, Х. Н. Гизатуллин, А. Д. Обухов [и др.] — Свердловск. УНЦ АН СССР, 1985. — 148 с.

47 Авторское свидетельство № 652221 СССР, МПК С 21 В 5/00. Способ работы группы доменных печей: 2510900/22-02; заявл.25.05.77; опубл.15.03.79. Бюл. № 10 / Андронов В. Н.; заявитель Донецкий НИИ черной металлургии. – 3с.

48 Авторское свидетельство № 998507 СССР, МПК С 21 В 5/00. Способ работы группы доменных печей: 3344795/22-02; заявл.12.10.81; опубл.23.02.83.

Бюл.№7 / Овчинников Ю. Н, Ченцов А. В., Спирин Н. А. [и др.]; заявитель Днепродзержинский индустриальный институт. – 5 с.

49 Гончаров, Б. Ф. Производство чугуна/ Б. Ф. Гончаров, И. С. Соломахин - М.: Металлургия, 1965. – 368 с.

50 Свойства жидких доменных шлаков: справочное пособие / В. Г. Воскобойников, Н. Е. Дунаев, А. Г. Михалевич [и др.] - М.: Металлургия, 1975. - 182 с.

51 Остроухов, М. Я. Процесс шлакообразования в доменной печи / М. Я. Остроухов. - М.: Металлургиздат, 1963. - 224 с.

52 Ефименко, Г. Г. Металлургия чугуна / Г. Г. Ефименко, А. А. Гиммельфарб, В. Е. Левченко. — Киев: Выща школа, 1988. — 351 с.

53 Ахметов, Н. С. Общая и неорганическая химия / Н. С. Ахметов // Учеб. для вузов. – 4-е изд. испр. – М.:Высш.шк., изд-во «Академия», 2001. - 743с.

54 Жило, Н. Л. Шлаковый режим доменных печей Южного Урала // Шлаковый режим доменных печей / под ред. Н. Л. Жило и М. Я. Остроухова. - М.: Металлургия, 1967. - С. 16 - 29.

55 Металлургия чугуна / Е. Ф. Вегман, Б. Н. Жеребин, А. Н. Похвиснев, Ю. С. Юсфин. - М.: Металлургия, 1978. – 475 с.

56 Готлиб, А. Д. Доменный процесс. - 2-е изд., испр. и доп./ А. Д. Готлиб - М.: Металлургия, 1966. - 503 с.

57 Васильев, В. Е. Доменная плавка на устойчивых шлаках / В. Е. Васильев. - Киев: Гостехиздат, 1956. - 260 с.

58 Оптимизация шлакового режима доменной плавки в условиях ОАО ДМЗ им. Петровского/ В. Н. Ковшов, И. И. Дышлевич, С. Н. Каракай [и др.]// Теория и практика металлургии. – 2002. - № 1. – С. 6 - 8.

59 Остроухов, М. Я. Эксплуатация доменных печей / М. Я. Остроухов, Л. Я. Шпарбер. – М.: Металлургия, 1975. – 264 с.

60 Физико-химические свойства конечных доменных шлаков заводов СССР/ Н. Л. Жило, Л. И. Большакова, М. Я. Остроухов [и др.] // Шлаковый режим доменных печей. –М.: Металлургия, 1967. –318 с.

61 Андронов, В. Н. Жидкие металлы и шлаки/ В. Н. Андронов, Б. В. Чекин, С. В. Нестеренко. – М.: Metallurgy, 1977. –128 с.

62 Сафина, Л. А. Влияние температуры, состава и вязкости шлака на его обессеривающую способность / Л. А. Сафина, Н. Н. Чернов // Изв. вузов., черн. металлургия. – 1975. - № 2. – С. 17-21.

63 Чернов, Н. Н. Вязкость и серопоглолительная способность доменных шлаков / Н. Н. Чернов, Л. А. Сафина // Металлы. – 1987. - № 2. – С. 10-15.

64 Куликов, И. С. Десульфурация чугуна/ И. С. Куликов. - М.: Metallurgizdat, 1962. - 308 с.

65 Большакова, Л. И. Физические свойства высокомагнезиальных доменных шлаков при выплавке бакальских сидеритов. Шлаковый режим доменных печей/ Л. И. Большакова, Н. Л. Жило; под ред. Н.Л. Жило и М.Я. Остроухова. - М.: Metallurgy, 1967. - С. 173-185.

66 Семик, И. П. Исследование обессеривающей способности высокомагнезиальных доменных шлаков / И. П. Семик //Сталь. – 1949. - №4. – С.300 - 306.

67 Семик, И. П. Исследование вязкости и плавкости высокомагнезиальных шлаков системы $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO} - \text{CaO}$ / И. П. Семик // Сталь. - 1949. - № 1. - С. 18–33.

68 Исследование фильтруемости продуктов доменной плавки через коксовую насадку/ А. Ю. Чернавин, В. А. Кобелев, Д. А. Чернавин, Г. А. Нечкин // Бюллетень «Черная металлургия». – 2019. - Т. 75, № 3. – С.315 - 321.

69 Тлеугабулов, Б. С. Совершенствование шлакового режима доменной плавки за счет использования добавок: автореферат дисс. канд.техн.наук: 05.16.02/ Тлеугабулов Борис Сулейманович. - Уральский государственный технический университет, Екатеринбург, 2010. – 24 с.

70 Некрасов, З. И. Первые итоги применения естественного газа в доменных печах СССР. – В кн.: Опыт применения естественного газа в доменном производстве/ З. И. Некрасов. – М.: Metallurgizdat, 1959. – С.55–62.

71 Некрасов, З. И. Технологические и экономические аспекты применения коксового газа в доменном производстве СССР / З. И. Некрасов, И. В. Страшников, Э. С. Хомяков // *Металлургия чугуна*. – М.: Metallurgy, 1973. – №1. – С. 81 – 84.

72 Доменная плавка с вдуванием коксового газа/ В. Ф. Пашинский, И. Г. Товаровский, П. Е. Коваленко, Н. Г. Бойков. – К: Техника, 1991. – 104 с.

73 Товаровский, И. Г. Совершенствование способа подачи коксового и природного газов или их смеси в горн с целью повышения возможности их использования/ И. Г. Товаровский, Н. М. Можаренко, Н. Г. Бойков//*Тр. ИЧМ*. – 1991. – 108 с.

74 Особенности взаимодействия окислов железа с метаном. Сообщение 1. / З. И. Некрасов, Л. Я. Сидорова, Н. А. Гладков [и др.] // *Изв. ВУЗов. Черная металлургия*. - 1975. - №11. - С. 15 - 18.

75 Богданди, ф. Л. Восстановление железных руд / Л. ф. Богданди, Г. - Ю. Энгель. - М: Metallurgy, 1971. - 520 с.

76 Симонов, В. К. Расчеты по теории процессов восстановления: учеб. пособие / В. К. Симонов, А. М. Гришин, В. П. Иващенко. – Днепропетровск: НМетАУ. - 2006. - 48 с.

77 Roadmap. Part of Energy Technology Perspectives Iron and Steel Technology (технологический отчет октябрь 2020 г) [Электронный ресурс]// International Energy Agency (IEA). [URL:https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap](https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap), (дата обращения: 10.09.2022).

78 Парижское соглашение в области климата и энергетики [Электронный ресурс] //Докл. ООН. FCCC/CP/2015/10/Add.1 Решение 1/CP.21: https://unfccc.int/files/meetings/paris_nov_2015/application/pdf/paris_agreement_russian.pdf (дата обращения: 11.09.2022).

79 Kick-off Workshop for the IEA Global Iron & Steel Technology Roadmap. [Электронный ресурс]// International Energy Agency (IEA). [URL: https://www.iea.org/events/kick-off-workshop-for-the-iea-global-iron-steel-technology-roadmap](https://www.iea.org/events/kick-off-workshop-for-the-iea-global-iron-steel-technology-roadmap), (дата обращения: 11.09.2022).

80 Technology Assessment and Roadmapping / M. Draxler, A. Sormann, T. Kempken and others [Электронный ресурс] // Green-Steel-for-Europe, June 2021. URL: <https://www.estep.eu/assets/Uploads/Technology-Assessment-and-Roadmapping.pdf>.

(дата обращения: 13.09.2022).

81 Howarth, W. R. How green is blue hydrogen? [Электронный ресурс] / R. W. Howarth, M. Z. Jacobson // Energy Science & Engineering, 2021. – V.9, Is.10. – P. 1676 – 1687; <https://doi.org/10.1002/ese3.956> , (дата обращения: 10.09.2022).

82 New Energy Outlook 2021 [Электронный ресурс]/ Seb Henbest [and others] // Bloomberg the Company & Its Products.URL: <https://about.bnef.com/new-energy-outlook/> (дата обращения: 10.09.2022).

83 Гриб, Н. Водородная энергетика: мифы и реальность [Электронный ресурс]/ Н. Гриб //Электронный журнал «Нефтегазовая Вертикаль». URL: <http://www.ngv.ru/magazines/article/vodorodnaya-energetika-mify-i-realnost/> (дата обращения: 05.08.2022).

84 Бироль, Ф. Японии предстоит пройти уникальный путь к чистому нулю, но она может достичь этого за счет инноваций и инвестиций [Электронный ресурс]/ Ф. Бироль // International Energy Agency (IEA), 28 июня 2021г. URL: <https://www.iea.org/commentaries/japan-will-have-to-tread-a-unique-pathway-to-net-zero-but-it-can-get-there-through-innovation-and-investment> (дата обращения: 05.09.2022).

85 Водород в Северо-Западной Европе (технологический отчет — апрель 2021г.) [Электронный ресурс] // International Energy Agency (IEA). URL:<https://www.iea.org/reports/hydrogen-in-north-western-europe> (дата обращения: 15.07.2022).

86 Injection Of Hydrogen Into Blast Furnace: Thyssenkrupp Steel Concludes First Test Phase Successfully [Электронный ресурс] // Hydrogen Central, 04.02.2021. URL: <https://hydrogen-central.com/injection-hydrogen-furnace-thyssenkrupp-steel-test-phase-successfully/> (дата обращения: 15.07.2022).

87 Водородная сталь или всё те же грабли [Электронный ресурс]//Chem.ru, 3-08-2020. URL: <https://chem.ru/neftgaz/30303-vodorodnaja-stal-ili-vse-te-zhe-grabli.html> (дата обращения: 19.06.2022).

88 Исследование высокотемпературных свойств железорудных материалов в лабораторных условиях/ А. С. Нестеров [и др.]// Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: сб. трудов ИЧМ НАНУ. – 2018. - №32. – С. 64-67.

89 Нестеров, А. С. Повышение эффективности доменной плавки за счет улучшения качества железорудных материалов /А. С. Нестеров, Л. И. Гармаш //Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: сб. трудов ИЧМ НАНУ. – 2019. - №33. – С. 43 – 60.

90 О вопросе десульфурации чугуна в горне доменной печи /А. М. Новохатский, О. М. Тищенко, Г. Д. Михайлюк, А. В. Скляр // Вестник Приазовского государственного технического университета, сер. Технические науки. – 2010. – вып. 21. – с. 21 - 25.

91 Патент 2547390 Российская Федерация, МПК С21В 3/00. Способ промывки доменной печи: №2014100432/02: заявл. 2014.01.09: опубл. 2015.04.10 / Е. Н. Виноградов, М. А. Гуркин, М. М. Каримов [и др.]; заявитель ПАО "Северсталь". – 7с.

92 Совершенствование технологии плавки в доменном производстве ПАО «Северсталь»/ Е. Н. Виноградов, А. А. Калько, Е. А. Волков [и др.]// Сталь. – 2016. - №1. – С. 16 - 21.

93 Повышение эффективности работы коксоаглодоменного производства ПАО «Северсталь»/ Е. Н. Виноградов, А. А. Калько, Е. А. Волков [и др.] //Бюллетень «Черная металлургия». – 2016. - №2. – С.26 - 29.

94 Патент 2 621206 С1 Российская Федерация, МПК С21В 5/04 (2006.01). Способ малошлаковой доменной плавки на магнезиальных шлаках: 2015150801: заявл. 26.11.2015: опубл. 01.06.2017 / Е. Н. Виноградов, А. А. Калько, М. А. Гуркин [и др.]; заявитель ПАО «Северсталь». – 6 с.

95 Ростовцев, С. Т. Теория металлургических процессов /С. Т. Ростовцев. – М.: Металлургиздат, 1956. – 515 с.

96 Взаимосвязь степени насыщения чугуна углеродом и разгара футеровки металлоприемника доменной печи/ Н. М. Можаренко, А. А. Параносенков, Г. В. Панчоха [и др.] // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр. — Днепропетровск.: ИЧМ НАНУ, 2006. — Вып. 12. — С. 77-84.

97 К вопросу определения насыщения углеродом передельного чугуна доменной плавки / Н. М. Можаренко, А. А. Параносенков, Д. Н. Тогобицкая, Г. В. Панчоха// Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр. — Днепропетровск: ИЧМ НАНУ, 2004. — Вып. 8. — С. 120-128.

98 Основы теории и технологии доменной плавки / А. Н. Дмитриев, Н. С. Шумаков, Л. И. Леонтьев, О. П. Онорин. — Екатеринбург: УрО РАН, 2005. — 545 с.

99 Blast furnace hearth condition monitoring and taphole management techniques/R. J. Nightingale, F. W. BU. Tanzil, A. J. G. Beck, K. Price // Rev. met. (France). —2001. — Т.98, №6. — Р. 533 – 540, V – VII.

100 Гуденау Г-В. Исследования на охлажденных доменных печах в Японии / Гуденау Г-В., Сасабе М., Крайбих К. // Черные металлы. — 1977. — № 6 -7. — С.13-17.

101 Dissection of Blast Furnaces and Their Internal State/ Kenjiro Kanbara [et al.]// Transactions ISIJ. - 1977. - V. 17. — Р.371-380

102 Доменное производство: Справочник в 2 т. - Т.1. Подготовка руд и доменный процесс. — М.: Металлургия, 1989. — 496с.

103 ГОСТ Р 54250-2010 (ИСО 18894:2006) Кокс. Определение реакционной способности (CRI) и прочности кокса после реакции (CRS).

104 Золотухин, Ю. А. Требования к качеству кокса для доменных печей с высоким расходом пылеугольного топлива/ Ю. А. Золотухин, Н. С. Андрейчиков / Сталь. — 2009. - №6. — С. 3 - 7.

105 Савчук, Н. А. Доменное производство на рубеже XXI века / Н. А. Савчук, И. Ф. Курунов // Новости черной металлургии за рубежом. — Ч. II. — Приложение 5. —2000. — 42 с.

106 Джигота, А. Д. Исследование влияния газификации кося на изменение свойств его пористого тела/А. Д. Джигота//Кокс и химия. — 1983. - №4.- С. 19 – 22.

107 Курунов, И. Ф. Качество кокса, его поведение в доменной печи и влияние на ее работу / И. Ф. Курунов // Новости черной металлургии за рубежом. Приложение 5.- 2003. – 38 с.

108 Состояние и особенности свойств фурменного кокса для доменных печей различного объема / А. С. Нестеров, А. Д. Джигота, Е. Н. Виноградов [и др.] // Сб. Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: сб. научн. тр. — Днепропетровск: ИЧМ НАНУ. - 2014. - № 28. - С. 110 - 116.

109 Альтпетер, В. Роль щелочей в доменной печи/ В. Альтпетер, Э. Беллер // Черные металлы. – 1988. - № 17. – С. 3-13.

110 Formation and Melt-down of Softening-Melting Zone in Blast Furnace / M. Sasaki, K. Ono, A. Suzuki [et al.]// Transactions ISIJ. - 1977. - V. 17. - P.391 - 400.

111 Гладков, Н. А. Реакционная способность коксов и их характеристики прочности/ Н. А. Гладков//Повышение эффективности работы доменных печей: тематический отраслевой сборник. Днепропетровск: ИЧМ. – 1983. – С.8-11.

112 Циватая, Н. А. Анализ поведения щелочей в доменной печи / Н. А. Циватая // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: сб. научн. тр. — Днепропетровск: ИЧМ НАНУ. – 2014. – № 29. – С. 90–101.

113 The effect of alkali on the reaction kinetics and strength of blast furnace coke /M. G. Dastidara [et al.] // Fuel, 2020.—V. 268. - 117388; <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117388>.

114 Rao, Y. K. On the mechanism of catalysis of the Boudouard reaction by alkali-metal compounds/ Y. K. Rao, A. Adjorlolo, J. H. Haberma // Carbon. – 1982. - V. 20, No. 3. - p. 207 - 212.

115 Новиков, Ю. Н. Слоистые соединения графита со щелочными металлами/ Ю. Н. Новиков, М. Е. Вольпин // Успехи химии. – 1971. - Т. XL, вып. 9. - с.1568 - 1592.

116 Chang, J-S. AES and sims analysis of potassium/graphite surfaces/ J.-S. Chang, L. L. Lauderback, J. L. Falconer// Carbon. – 1991. -V.29, N. 415. - P. 645 - 652.

117 Investigation of the structure forms of potassium in coke by electron microscopy and X-ray absorption spectroscopy/ G. P. Huffman [et al.]//Fuel. – 1986. – V.65. – P.621 - 632.

118 A study on the characteristics of coke in the hearth of a super large blast furnace/Q. Q. Lv, Y. S. Tian, P. Du [et al.]// PLOS ONE. – 2021 - № 3. – P.1-17; <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0247051>.

119 Чуфаров, Г. И. Термодинамика процессов восстановления окислов металлов/ Г. И. Чуфаров, А. Н. Мень, В. Ф. Балакирев. – М.: «Металлургия», 1970. – 400 с.

120 Патент 2733610 С1 Российская Федерация, МПК С10В 57/04 (2006.01) С10В 57/06 (2006.01). Инновационный продукт углеродсодержащий и способ его получения: 2019134518: заявл. 28.10.2019: опубл. 05.10.2020 / Е. Н. Виноградов, Е. В. Карунова, А. А. Калько, В. В. Гороховский; заявитель ПАО «Северсталь». – бс.

121 Базилевич, С. В. Агломерация / С. В. Базилевич, Е. Ф. Вегман. – М.: «Металлургия», 1967. – 368 с.

122 Вегман, Е. Ф. Теория и технология агломерации / Е. Ф. Вегман. – М.: «Металлургия», 1974. – 288 с.

123 Коротич, В. И. Агломерация рудных материалов / В. И. Коротич, Ю. А. Фролов, Г. Н. Бездежский. - Екатеринбург: ГОУ ВПО «УГТУ-УПИ», 2003. - 400 с.

124 Современные технологические приемы повышения стабильности и эффективности плавки, применяемые на доменной печи №5 ОАО «Северсталь»/ В. И. Большаков, А. С. Нестеров, Н. Г. Иванча [и др.]// Доклад на конференции «Проблемы доменного и смежных производств в современных условиях. Технологии использования разных видов топлива и сырья», 20-24 май 2013 г., Ялта. – С.72 – 92.

125 Об улучшении газодинамических характеристик шихтовых материалов в процессе загрузки доменных печей / Е. Г. Донсков, А. Д. Учитель, И. Г. Ризницкий [и др.] // Сталь. - 1980. – №7. – С. 552-559.

126 Коробов, И. И. Об улучшении распределения на колошнике шихты, содержащей окатыши / И. И. Коробов, А. И. Галаганов, В. Н. Ковшов // Metallurgical and Mining Industry. – 1977. – №3. - С. 1 - 4.

127 Патент 2 518 880⁽¹³⁾ С1 Российская Федерация, МПК С21 В 7/00 (2006.01). Способ загрузки доменной печи: 2013100318/02: заявл. 09.01.2013, опубл.

10.06.2014 / Суханов М. Ю., Гуркин М. А., Виноградов Е. Н. [и др.]; заявитель ПАО «Северсталь» – 7 с.

128 Патент 2 673 898⁽¹³⁾ С1 Российская Федерация, МПК С21В 5/00 (2006.01). Способ загрузки доменной печи: 2017139370: заявл. 13.11.2017, опубл. 03.12.2018 / Суханов М. Ю., Гуркин М. А., Виноградов Е. Н. [и др.]; заявитель ПАО «Северсталь» – 7 с.

129 Рамм, А. Н. Применение комбинированного дутья в доменной плавке // В сб. «Современные проблемы металлургии»/ А. Н. Рамм. –М.: АН СССР, 1968.– С.61–95.

130 Рамм, А. Н. Определение технических показателей доменной плавки. Методическое руководство / А. Н. Рамм. – Ленинград: ЛПИ, 1971. – 111с.

131 Касьян, В. В. Теоретическая температура горения как параметр комбинированного дутья / В. В. Касьян // Сталь. –1975. – №8. – С.684–687.

132 Борисов, Ю. С. Расчет теоретической температуры горения при комбинированном дутье в доменных печах / Ю. С. Борисов // Сталь. – 1965. – №10. – С.884 –890.

133 Технологические факторы, определяющие теоретическую температуру горения /Ю. М. Потенция, Р. Г. Рихтер Т. А. Тулуевская, Т. С. Цаплина // Сталь. – 1982. – №10. – С.14 – 17.

134 Юсфин, Ю. С. Влияние расхода кокса на теоретическую температуру горения / Ю. С. Юсфин, В. Л. Королева, А. И. Мышляев // Изв. ВУЗов. Черная металлургия. –1991. – №5. – С.8 – 12.

135 Андронов, В. Н. Современная доменная плавка / В. Н. Андронов. - Учебное пособие, Санкт-Петербург: Изд-во СПбГТУ, 2001. – 100с.

136 Довголюк, Б. П. Основные номограммы доменного процесса / Б. П. Довголюк. – К.: Техника, 1985.– 56 с.

137 Технологические аспекты применения в доменной плавке топливных добавок, вводимых в фурменные зоны совместно с дутьем, обогащенным кислородом. /В. Г. Воскобойников, Н. Е. Дунаев, Б. Л. Журковский [и др.] // Сталь. – 1980. – №10. – С. 888–896.

138 Некоторые особенности теплового режима горна при работе на комбинированном дутье / А. В. Дидевич, Ю. М. Тютюнник, Н. И. Храпко [и др.] // Тр. ДОННИИЧМ. - 1970. - С. 68 - 74.

139 Товаровский, И. Г. Доменная плавка. Эволюция, ход процессов, проблемы и перспективы / И. Г. Товаровский. – Днепропетровск: Пороги, 2003.— 600 с.

140 Критерии оптимальности расхода природного газа, вдуваемого в доменную печь / Б. П. Довгалюк, В. Н. Никифоров, П. К. Лебедь [и др.] // Сталь. – 1983. – №2. – С.6 – 8.

141 Гладков Н. А. Анализ опыта использования комбинированного дутья / Н.А. Гладков // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр. — Днепропетровск.: ИЧМ НАНУ, 2009. — Вып. 20. — С. 37 - 44.

142 Бабарыкин, Н. Н. Взаимосвязь между степенями использования водорода и окиси углерода в доменной печи /Н. Н. Бабарыкин // Сталь. – 1973.— №8.— С. 684—687.

143 Рогожников, С. П. Влияние водорода природного газа на изменение теплового и восстановительного процессов по радиусу доменной печи / С. П. Рогожников, И. С. Рогожников // Черная металлургия. Бюллетень научно - технической и экономической информации. - 2020. - Т. 76, № 1. - С. 41 - 49.

144 Применение комбинированного дутья в доменных печах Магнитогорского металлургического комбината / Н. Н. Бабарыкин, Н. М. Крюков, В. С. Новиков [и др.] // Сталь. - 1976. - № 3. - С. 204–208.

145 Опытная плавка в доменной печи объемом 2000 м³ при обогащении дуться кислородом до 30%/ З. И. Некрасов, П. Г. Нетребко, Ф. Н. Москалина, В. А. Шатлов // Сталь. – 1971. - №10. – С. 887–894.

146 A Review on the Kinetics of Iron Ore Reduction by Hydrogen / Aidin Heidari, Niussha Niknahad, Mikko Iljana and Timo Fabritius // Materials. - 2021. – V.14, Is.24. – 7540; <https://doi.org/10.3390/ma14247540>.

147 Steffen, R. Hydrogen for the reduction of iron ores—State of the art and future aspects / R. Steffen, K. H. Tacke// Stahl und Eisen. – 2004. - Is.124. – №. 4. – P.45–52.

148 Rau, M.F. Investigation of iron oxide reduction by TEM/ M. F. Rau, D. Rieck, J. W. Evans // Metall. Trans. B. – 1987. – Is.18. – P. 257–278; <https://doi.org/10.1007/BF02658451>

149 Der Mechanismus der Reduktion von porigen Eisenerzen durch Wasserstoff / V. L. Bogdandy, H. P. Schulz, B. Wiirzner [et al.] // Arch. Eisenhüttenwes. – 1963. – B.34. – S.401–409; <https://doi.org/10.1002/srin.196303460>.

150 Yang, Y. Ironmaking / Y. Yang, K. Raipala, L. Holappa // Elsevier Ltd.; Amsterdam, The Netherlands. - 2014. – Vol.3, ISBN 9780080969886.

151 Ranzani da Costa. Modelling a new, low CO₂ emissions, hydrogen steelmaking process/ Ranzani da Costa, D. Wagner, F. Patisson //Journal of Cleaner Production. - 2013. – Is.46. – P. 27 – 35. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1402.1715>.

152 Kawasaki, E. Kinetics of reduction of iron oxide with carbon monoxide and hydrogen / E. Kawasaki, J. Sanscrainte, T. J. Walsh // AIChE J. -1962. – V.8, Is.1. – P.48–52; <https://doi.org/10.1002/aic.690080114>.

153 Action rules of H₂ and CO in gas-based direct reduction of iron ore pellets / L. Yi, Z. Huang, H. Peng, T. Jiang // J. Cent. South. Univ. – 2012. -V.19. - P. 2291–2296; <https://doi.org/10.1007/s11771-012-1274-0>.

154 Разработка и внедрение технологии замещения кокса природным газом для снижения расхода твердого топлива на классических доменных печах ПАО «Северсталь» /Е. Н. Виноградов, А. А. Калько, С. В. Чикинов [и др.]//Металлург.- 2024. - №1.- с. 11–16.

155 Патент 2 798507 С1 Российская Федерация, МПК С21 В 5/00. Способ ведения доменной плавки: 2022126579; заявл. 12.10.2022, опубл. 23.06.2023. Бюл. № 18 / Виноградов Е. Н., Калько А. А., Волков Е. А. [и др.]; заявитель ПАО «Северсталь» – 7 с.

156 Методика определения интегральной эмиссии диоксида углерода в процессах черной металлургии для их сравнительной оценки / А. В. Лаптева, В. Г. Лисиенко, Ю. Н. Чесноков [и др.] // Современные научные достижения металлургической теплотехники и их реализация в промышленности : сб. докл. междунар. научно-практич.конференции, Екатеринбург, 17–18 сентября 2015 г. — Екатеринбург : [УрФУ] 2015. — С. 58-62.

157 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

158 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

159 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

Приложение

Директор по техническому
развитию и качеству дивизиона
«Северсталь-Российская сталь»
ПАО «Северсталь»



Р.Р. Адигамов
25 декабря 2025г.

Акт

Внедрения технологических мероприятий, обеспечивающих за счет ресурсосберегающих технологий повышение эффективности коксоаглодоменного производства ПАО «Северсталь»

Разработаны, запатентованы и внесены в технологические инструкции ПАО «Северсталь» следующие технологические мероприятия, позволяющие:

1. Сокращать затраты на производство чугуна за счет 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. Патент №2733610 РФ. Инновационный продукт углерод содержащий и способ его получения: №2019134518; заявл. 28.10.2019.; опубл. 05.10.2020. Бюл. № 28. Внесены изменения в технологическую инструкцию: ТИ Д-10-2024* п.4.1.10 (стр.27-28).
2. Вести малошлаковую (180-250 кг шлака/т чугуна) доменную плавку 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. Патент №2621206 РФ. Способ малошлаковой доменной плавки на магнезиальных шлаках: №2015150801; заявл. 2015.11.26; опубл. 01.06.2017. Бюл. № 16. Внесены изменения в технологическую инструкцию: ТИ Д-10-2024* п.4.1.6 (стр.24).
3. Осуществлять загрузку доменных печей железорудным сырьем с использованием некондиционных фракций агломерата, что позволяет повысить производительность агломерационных машин за счет снижения отсева агломерата и снизить расход топлива. Патент 2673898 РФ. Способ загрузки доменной печи: №2017139370; заявл. 13.11.2017, опубл. 03.12.2018. Бюл. №34– 7 с. Внесены изменения в технологическую инструкцию: ТИ Д-10-2024* п.4.1.5 (стр.23). Максимальное фактическое использование фракции 3-5 мм агломерата для выплавки чугуна составило 204 тыс.т /год или 22,3 кг/ чугуна в 2017г.
4. Вести доменную плавку с использованием двух видов кокса, различающихся горячей прочностью (CSR) на величину более 5% Патент № 2608004 РФ. Способ ведения доменной плавки: № 2015132412, заявл. 03.08.2015; опубл. 11.01.2017. Бюл. № 2. Внесены изменения в технологическую инструкцию: ТИ Д-01-2022** п.4.7.3.22 (стр.58), и Приложение «Р» к данной ТИ (стр.162).

Внедрение запатентованных технологических решений в коксоаглодоменном производстве ПАО «Северсталь» позволили за период 2019-2025гг. произведено и использовано при выплавке чугуна 2,3 млн.т ИПУС, произведенного из шихты, содержащей от 60 до 100% малоценных угольных концентратов. Максимальное фактическое использование фракции отсева 3-5 мм агломерата для выплавки чугуна составило 204 тыс.т /год или 22,3 кг/ чугуна в 2017г.

Менеджер (развитие интеллектуальной собственности)

С.В. Шаталов

Примечание:

* ТИ Д10-2024 – технологическая инструкция ПАО «Северсталь» «Специальные режимы работы по выплавке чугуна на доменных печах №№1-5 коксоаглодоменного производства».

** ТИ Д-01-2022 – технологическая инструкция ПАО «Северсталь» «Ведение процесса выплавки чугуна на доменных печах №№1-5 коксоаглодоменного производства».