

На правах рукописи



**Харченко Александр Сергеевич**

**ИНТЕРАКТИВНАЯ СИСТЕМА ЭНЕРГОРЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ  
ПРИ ВЫПЛАВКЕ ЧУГУНА В ДОМЕННЫХ ПЕЧАХ, ОСНАЩЕННЫХ  
ЛОТКОВЫМ ЗАГРУЗОЧНЫМ УСТРОЙСТВОМ:  
НАУЧНО ОБОСНОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ**

05.16.02 – Metallurgy of black, colored and rare metals

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Магнитогорск – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Научный консультант **Сибгатуллин Салават Камирович**,  
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Валавин Валерий Сергеевич**, доктор  
технических наук, ФГАОУ ВО  
«Национальный исследовательский  
технологический университет «МИСиС»,  
директор инновационного научно-учебного  
центра «Ромелт».

**Дмитриев Андрей Николаевич**, доктор  
технических наук, профессор, ФГБУН «Институт  
металлургии Уральского отделения Российской  
академии наук», главный научный сотрудник  
лаборатории пирометаллургии черных металлов.

**Рощин Василий Ефимович**, доктор  
технических наук, профессор, ФГАОУ ВО  
«Южно-Уральский государственный университет  
(национальный исследовательский университет)»,  
главный научный сотрудник кафедры  
пирометаллургических процессов.

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Сибирский государственный  
индустриальный университет», г. Новокузнецк.

Защита состоится 25 февраля 2020 года в 14<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.111.01 на базе ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» по адресу: 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, малый актовЫй зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» <http://www.magtu.ru>.

Автореферат разослан «\_\_» декабря 2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Мезин Игорь Юрьевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Металлургия чёрных металлов относится к стратегическим отраслям промышленности; характеризуется большими количествами производимой продукции и, соответственно, потребляемых сырьевых материалов и топлива, в том числе дорогого его вида – кокса, использующего дефицитные виды углей, создающего сложности для экологических условий существования человеческого общества. Мировое производство стали за последние 25 лет увеличилось более чем вдвое и достигло 1,7 млрд т/год, при доле доменного чугуна в металлошифте 64 %. По прогнозам схема выплавки металла, включающая производство чугуна в доменных печах, будет актуальной в течение нескольких десятилетий. Потребление природных ресурсов примерно в 10 раз выше количества производимого металла. Для выполнения государственной программы о воспроизводстве и использовании природных ресурсов, утвержденной правительством РФ в апреле 2014 года, энергетической стратегии России на период до 2030 года необходимо обеспечивать рациональное их использование и снижение безвозвратных потерь для устойчивого роста экономики, повышения качества жизни населения страны и содействия укрепления ее внешнеэкономических позиций. В связи с этим важным направлением совершенствования металлургии чёрных металлов является энерго- и ресурсосбережение при проведении доменной плавки, доля которой от общего потребления энергоресурсов составляет более 50 %.

Современная тенденция развития науки и техники в металлургии чугуна характеризуется развитием, внедрением и широким использованием конкретных приёмов повышения производительности, сокращением потребления кокса, снижением содержания серы в чугуне, удалением настывки от футеровки, формированием защитного гарнисажа на футеровке, уменьшением потерь железа, в том числе на печах, оснащённых бесконусными загрузочными устройствами лоткового типа (БЗУ). В РФ такие устройства имеют доменные печи ведущих компаний – ПАО «ММК», ПАО «НЛМК», ПАО «Северсталь», ПАО «ЕВРАЗ НТМК», ПАО «ТУЛАЧЕРМЕТ», суммарным полезным объемом 35150 м<sup>3</sup>, которые производят более 50% чугуна в стране.

В соответствии с этим вектор развития приводит к необходимости разработки научно обоснованной системы, позволяющей решать комплексные взаимосвязанные задачи, охватывающие термодинамику и кинетику твёрдофазных и жидкофазных процессов в металлургии чугуна, газодинамику, тепло- и массообмен, коллективное поведение различных элементов в ходе доменной плавки, материало- и энергосбережение.

Диссертационная работа выполнена по тематике хоздоговорных НИР ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» и государственного задания Министерства образования и науки РФ.

## **Степень разработанности темы исследования**

Работа развивает научное направление, начатое в Магнитогорском государственном техническом университете им. Г.И. Носова Заслуженным деятелем науки и техники РФ, доктором технических наук, профессором А.Н. Похвисневым, продолженное профессором А.М. Банных, в последующем развитие доктором технических наук, профессором М.А. Стефановичем.

Материалы диссертации опираются на научные труды многих исследователей научных учреждений, университетов и металлургических предприятий: ФГАОУ НИТУ «МИСиС», ФГБУН «Институт металлургии УрО РАН», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», Институт металлургии им. А.А. Байкова РАН, ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», ФГУП «ЦНИИЧермет им. И.П. Бардина», ГК МетПром, ОАО «УИМ», ОАО «ВНИИМТ», ФГБОУ ВО НИТУ «ЮУрГУ», ФГБОУ ВО «СибГИУ», ФГБОУ ВО «ЛГТУ», Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, ФГБОУ ВО «Череповецкий государственный университет», ИЧМ НАН Украины, Национальная металлургическая академия Украины, Донецкий национальный технический университет, Днепродзержинский государственный технический университет, Приазовский государственный технический университет, Криворожский технический университет, ДонНИИЧермет, Донбасский горно-металлургический институт, ХМИ им. Ж. Абишева (Казахстан), КарГИУ (Казахстан), ООО ТАЛС-1, ООО «КОРПОРАЦИЯ ЧЕРМЕТ», НПВП ООО «ТОРЕКС», ЗАО «ТОТЭМ», НПО ООО «СПБ ЭК», ассоциация «Русская Сталь», ООО «Северсталь-Проект», ООО «Системосервис», НПП «Киевский институт автоматки», ПАО «ММК», ПАО «НЛМК», ПАО «Северсталь», ПАО «ЕВРАЗ НТМК», ПАО «ГУЛАЧЕРМЕТ и др.

Первостепенными научными проблемами являются:

- развитие теории локального воздействия на лимитирующие зоны и процессы доменной плавки;
- разработка и внедрение усовершенствованных технологических параметров работы доменных печей.

## **Цель работы**

Разработка новых научно обоснованных технологических решений локального воздействия на лимитирующие зоны и процессы доменной плавки при выплавке чугуна в печах, оснащенных лотковым загрузочным устройством, для энергоресурсосбережения в металлургии использованием предложенной интерактивной системы.

## **Основные задачи**

1. Физическим и математическим моделированием, промышленным экспериментированием доказать эффективность локального воздействия на лимитирующие зоны и процессы доменной плавки для энергоресурсосбережения и внедрить полученные результаты, разработав структуру интерактивной системы с приёмами цифровизации.

2. Выявить закономерности совместного поступления компонентов железорудного сырья и добавочных материалов из бункера БЗУ лоткового типа в колошниковое пространство печей с получением математических зависимостей, позволяющих локально размещать их по видам в заданной зоне колошника для эффективного воздействия на определяющие процессы и зоны.

3. Создать методику определения коэффициента, отражающего соответствие технологическому регламенту распределения шихтовых материалов и газов по окружности печей, установить взаимосвязь его величины с показателями хода процессов, выявить способы повышения эффективности их хода в лимитирующих зонах.

4. Рассчитать и экспериментально оценить рациональные параметры загрузки многокомпонентной шихты и использования комбинированного дутья, обеспечивающие необходимое распределение материалов и газов по окружности печей, для энергоресурсосбережения воздействием на лимитирующие процессы и зоны.

5. Адаптировать способы локального целевого размещения материалов по видам (агломерат, окатыши, материалы для промывки или формирования гарнисажа) на заданном удалении от футеровки печей режимами совместного набора компонентов шихты в бункер БЗУ и выпуска из него.

6. Обосновать и исследовать режимы загрузки шихтовых материалов, обеспечивающих сохранение геометрических параметров рабочего профиля доменных печей и повышение срока их службы локальным воздействием на лимитирующие зоны и процессы.

7. Установить и апробировать способы снижения удельного расхода кокса и повышения производительности доменных печей воздействием на параметры загрузки и дутья в условиях работы с верхней лимитирующей зоной по газодинамике и при определяющей роли дренажной способности коксовой насадки в горне.

### **Научная новизна и теоретическая значимость работы**

1. Развита теория локального воздействия на лимитирующие зоны и процессы доменной плавки для энергоресурсосбережения в металлургии чугуна разработкой новых научно обоснованных технологических решений структурированных в интерактивную систему с приёмами цифровизации.

2. Получен комплекс математических зависимостей очередности и равномерности поступления из шихтового бункера железорудных материалов и добавок по видам и крупности при различных условиях загрузки. Высокие значения коэффициента равномерности поступления компонентов шихты по виду и крупности из бункера БЗУ достигались загрузкой окатышей между слоями агломерата, сформированными в количестве 25-50 и 75-50% от его общего расхода, располагающимися в бункере БЗУ соответственно под и над окатышами. При доле окатышей 30-38% от расхода железорудной части шихты средние величины показателя равномерности по крупности и массе составили соответственно 0,90 и 0,79.

3. Создана теоретически обоснованная методика оценки соответствия технологическому регламенту распределения шихтовых материалов и газов по окружности печей на основе  $\chi^2$  - статистики, используя квантили  $\chi_k^2$  - статистики для вычисления  $p = p(\chi_k^2)$ , дополняющая теорию доменного процесса.

4. Установлена взаимосвязь коэффициента по  $\chi^2$  - статистике (по пункту 2), с режимами загрузки, параметрами дутья и показателями работы печей. Уменьшению этого коэффициента применительно к окружному распределению температуры периферийных газов в верхней части шахты с 0,77 до 0,34 соответствовало повышение показателя равномерности поступления компонентов шихты из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи с 0,30 до 0,71. На каждые 10% уменьшения коэффициента приходилось увеличение производительности печей в среднем 0,22%, понижение удельного расхода кокса 0,41%.

5. Дополнены закономерности по формированию слоёв агломерата, окатышей и добавочных материалов в бункере БЗУ и в колошниковом пространстве печей, обеспечивающие повышение производительности, сокращение потребления кокса и требуемое качество металла при повышенной стойкости футеровки для различных условий процесса. Адаптация их к определяющим процессам и зонам позволила:

- уменьшить толщину настыва в шахте печи, что повысило производительность одной из печей на 18,9 % и понизило удельный расход кокса на 5,8 %.

- снизить интервал температур холодильников шахты до рационального уровня 40-50 °С на печах, работавших с повышенными тепловыми нагрузками футеровок шахты, распара, заплечиков.

6. Разработаны теоретически обоснованные энерго- и ресурсосберегающие технологии локальной загрузки промывочных материалов для рациональной очистки зон горна с наилучшей дренажной способностью коксовой насадки. Апробация их на печах, работающих с определяющей ролью дренажа продуктов плавки через слой кокса, показала:

- загрузка соответствующих компонентов шихты (марганцевая, кремнеземо-марганцовистая руды, конвертерный шлак) к осевой зоне целесообразна при работе на коксе с горячей прочностью по CSR менее 35 %;

- при величине CSR более 40% наилучшим результатам соответствует загрузка в зону рудного гребня;

- в условиях работы печи с горячей прочностью кокса в интервале 35-40% предпочтительно загружать равномерно по сечению.

7. Выявлено и научно обосновано прямое и обратное влияние горячей прочности кокса по CSR и его реакционной способности по CRI на газодинамику нижней части печи:

- при расходе природного газа в интервале 85-115 м<sup>3</sup>/т чугуна повышение горячей прочности кокса по CSR на 0,5% абс. в интервале 55,5-57,4% на до-

менной печи, работающей с определяющей ролью силового взаимодействия потоков шихты в нижней части, уменьшало коэффициент сопротивления шихты на 1,04%,

- в интервале расхода природного газа 115-132 м<sup>3</sup>/т чугуна повышение горячей прочности кокса на ту же величину увеличивало коэффициент сопротивления шихты на 0,87%.

8. Обнаружено новое, научно обоснованное и промышленными экспериментами доказанное направление снижения удельного расхода кокса совместным повышением реакционной способности кокса по CRI и удельного расхода природного газа при выплавке чугуна в доменных печах. Рост показателя CRI от 35 до 40 % обеспечивал увеличение потребления природного газа более чем на 20 м<sup>3</sup>/т чугуна с эквивалентом замены кокса не менее 0,7 кг/м<sup>3</sup> при постоянном содержании кислорода в дутье 27,4 %.

### **Практическая ценность и реализация результатов**

Новые научные результаты были использованы в следующих разработках, внедренных в ПАО «ММК» (акты внедрения и испытаний прилагаются):

1. Энергоресурсосберегающий режим доменной плавки в условиях верхней лимитирующей зоны по газодинамике, снижающий потребление скипового кокса использованием кокса мелких классов с расходом до 20 кг/т чугуна при коэффициенте замены в интервале 0,68-0,91 кг/кг (2012 г.).

2. Локальное воздействие на лимитирующие зоны и процессы, позволяющие снижать расход кокса увеличением потребления природного газа (2013, 2019 гг.);

3. Разработанные рациональные параметры загрузки многокомпонентной шихты, обеспечивающие повышенную равномерность распределения материалов и газов по окружности печей, для энергоресурсосбережения воздействием на лимитирующие процессы и зоны (2014, 2019 гг.).

4. Локальное размещение агломерата и окатышей относительно футеровки печи при их совместном поступлении в скипах для уменьшения толщины настыли в шахте в среднем на 80 мм, повышения срока службы футеровки снижением интервала температур холодильников шахты до рационального уровня 40-50 °С (2015 г.).

5. Способы уменьшения потерь железа с выносимой пылью и шламом, снижения удельного расхода кокса и повышения производительности доменных печей воздействием на режим загрузки агломерата и окатышей в колошниковое пространство по их горячей прочности (2015 г.).

6. Способы повышения производительности доменных печей и улучшения качества чугуна локальным целевым размещением материала с повышенным содержанием MgO в слой окатышей, укладывая кластер «магнезиальный материал-окатыши» между слоями агломерата (2017 г.).

7. Технологические решения, обеспечивающие рациональную промывку локальных зон горна с учётом качества кокса по CSR и CRI, сохранение геометрических параметров рабочего профиля доменных печей и повышение их производительности (2018 г.).

Результаты исследований послужили основой для внесения изменений в технологическую инструкцию ПАО «ММК» ТИ 101-Д-22-2014 (изменения прилагаются).

Результаты диссертации используются в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлениям подготовки 22.03.02, 22.04.02 – Metallургия, кадров высшей квалификации по направлению 22.06.01 – Технологии материалов (акт внедрения прилагается).

#### **Методология и методы исследования**

В работе применяли методы физического и математического моделирования с соблюдением критериев подобия, экспериментальные исследования в лабораторных и промышленных условиях. Энергоресурсосберегающие режимы загрузки доменных печей разработаны моделированием на укрупнённой лабораторной установке БЗУ лоткового типа, имеющей поперечные размеры 1,6x1,5 м, высоту 3,72 м, массу 1,2 т. Она оснащена скиповой системой загрузки. Масштаб моделирования 1 : 5 БЗУ доменных печей полезным объёмом 1370 м<sup>3</sup> ПАО «ММК». Изготовлена по проекту ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова». В процессе проведения экспериментов на модели использовали полный двухфакторный план, трехфакторный план Бокса Бенкена. При обработке результатов применили дисперсионный и канонический анализы.

Использовали другие составляющие разработанной интерактивной системы локального воздействия на лимитирующие зоны и процессы доменной плавки: изучение производственной информационной среды, проведение опытных плавки, технологическое сопровождение тестируемых специальных режимов, разработка изменений в технологическую инструкцию с согласованием со специалистами ПАО «ММК», внедрение полученных результатов. Разработанные локальные воздействия имеют 3D - эффект – воздействие местное, а результат отражается в объёме всей печи.

Изменение показателей хода процессов в печах оценивали детерминированным моделированием. При обработке промышленных данных использовали статистический анализ, в том числе нейросетевое моделирование, факторный анализ. Осуществляли прогнозирование эффективности работы доменной печи приложением Марковских цепей.

#### **Положения, выносимые на защиту**

На защиту выносятся следующие новые научные результаты:

1. Новые научно обоснованные технологические решения локального воздействия на лимитирующие зоны и процессы доменной плавки для энергоресурсосбережения использованием разработанной интерактивной системы с приёмами цифровизации.

2. Закономерности совместного поступления агломерата, окатышей, добавочных материалов – марганцевой, железной, титаномагнетитовой руд, коксового орешка – из бункера БЗУ в колошниковое пространство с использованием физического моделирования на установке лоткового загрузочного устройства, математических зависимостей для локального размещения их по

видам, руководствуясь местом расположения определяющих процессов и зон.

3. Методика оценки соответствия распределения материалов и газов по окружности доменных печей технологическому регламенту на основе теории статистики и новые результаты исследований взаимосвязи его показателя с показателями хода процессов; выявленные способы повышения эффективности их хода в лимитирующих зонах.

4. Рациональные параметры загрузки многокомпонентной шихты и использования комбинированного дутья, обеспечивающие необходимую равномерность распределения материалов и газов по окружности печей, оснащенной БЗУ лоткового типа для повышения их производительности и снижения удельного расхода кокса.

5. Способы локального целевого размещения материалов по видам и крупности на заданном удалении от футеровки печей режимами совместного набора компонентов шихты в бункер БЗУ и выпуска из него.

6. Технологические решения, обеспечивающие сохранение геометрических параметров рабочего профиля доменных печей и повышение срока их службы локальным воздействием на лимитирующие зоны и процессы.

7. Теоретически обоснованные и экспериментально подтвержденные способы снижения удельного расхода кокса и повышения производительности доменных печей воздействием на режим загрузки железорудного сырья по горячей прочности, кокса по реакционной способности, на дутьё расходом природного газа.

**Достоверность полученных результатов** подтверждается соответствием основным критериям подобия физической модели БЗУ загрузочному устройству работающей доменной печи, высоким уровнем сходимости результатов моделирования и промышленных испытаний, применением современных измерительных приборов и пакетов прикладных программ, соответствием выявленных закономерностей фундаментальным положениям теории доменного процесса, движения сыпучих сред, газового потока, жидкостей, теплопередачи, массообмена.

#### **Соответствие паспорту специальности**

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 05.16.02 – Металлургия черных, цветных и редких металлов: п. 4 «Термодинамика и кинетика металлургических процессов», п. 5 «Металлургические системы и коллективное поведение в них различных элементов», п. 6 «Газо- и аэродинамика в металлургических агрегатах», п.10 «Твёрдофазные процессы в получении черных, цветных и редких металлов», п. 17 «Материало- и энергосбережение при получении металлов и сплавов».

#### **Апробация работы**

В 2019 г. материалы диссертации доложены на научно-технических советах: ФГАОУ НИТУ «МИСиС» (г. Москва), ФГБУН «Институт металлургии УрО РАН» (г. Екатеринбург), ФГБОУ ВО «СибГИУ» (г. Новокузнецк).

В 2017 г. получена серебряная медаль на Международной промышленной выставке «МЕТАЛЛ-ЭКСПО» за технологию доменной плавки, обеспечивающей в условиях роста доли окатышей сохранение величины тепловых нагрузок на систему охлаждения шахты, распара и заплечиков на рациональном уровне в пределах 40-50 °С.

Основные положения работы доложены и обсуждены на следующих конференциях: V, VIII и IX Международных конгрессах доменщиков (Украина, Ялта, 2010 г.; Россия, Москва, 2016 г. «Металлургия чугуна – вызовы XXI века»; Нижний Тагил, 2018 г. «Металлургия чугуна. Перспективы развития до 2025 г.»); 72-76-й Международных научно-технических конференциях «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» (Магнитогорск, 2012-2018 гг.); 9-й Международной научно-технической конференции «Современная металлургия начала нового тысячелетия» (Липецк, 2012 г.); Межрегиональной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и производство Урала» (Новотроицк, 2012, 2014, 2015 гг.); Международной научно-практической конференции «Теория и практика тепловых процессов в металлургии» (Екатеринбург, 2012 г.); II, III, IV-й всероссийских научно-практических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «ТИМ» с международным участием (Екатеринбург, 2013, 2014, 2015 гг.); Международной научно-практической конференции «Создание высокоэффективных производств на предприятиях горно-металлургического комплекса» (Екатеринбург, 2013 г.); Международном форуме промышленных технологий для горного дела, металлургии, материалобработки и машиностроения «Мир промышленности/Win Russia Ural» (Екатеринбург, 2014 г.); Международной научно-практической конференции «Творческое наследие В.Е. Грум - Гржимайло», посвященная 150-летию со дня рождения В.Е. Грум – Гржимайло (Екатеринбург, 2014 г.); 5-й Международной научно-технической конференции «Металлургические процессы и оборудование» (Донецк, Украина, 2013 г.); IV, V-й Международных научно-практических конференциях «Инновации в металлочерепице и металлургии» (Екатеринбург, 2014, 2015 гг.); Научно-практической конференции с международным участием и элементами школы молодых ученых «Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР» (Екатеринбург, 2015 г.); XII-й всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Современные проблемы горно-металлургического комплекса» (Старый Оскол, 2015 г.); Международной научно-практической конференции «Материаловедение. Машиностроение. Энергетика» (Екатеринбург, 2015 г.); XIX-й Международной научно-практической конференции «Металлургия: технологии, инновации, качество» (Новокузнецк, 2015 г.); Научно-технической конференции «Современное состояние и перспективы развития металлургии железа», посвященной 100-летию со дня рождения А.М. Бигеева (Магнитогорск, 2017 г.); научно-практической конференции с международным участием и элементами школы молодых ученых «Перспективы развития металлур-

гии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР: ФЕРРОСПЛАВЫ» (Екатеринбург, 2018 г.).

**Личный вклад автора заключается:** в развитии теории локального воздействия на лимитирующие зоны и процессы доменной плавки для энергоресурсосбережения в металлургии разработкой новых научно обоснованных технологических решений, структурированных в интерактивную систему, позволяющей решать комплексные взаимосвязанные задачи, охватывающие термодинамику и кинетику твёрдофазных и жидкофазных процессов в металлургии чугуна, газодинамику, тепло- и массообмен, коллективное поведение различных элементов в ходе доменной плавки, материало- и энергосбережение при работе металлургического предприятия; разработке методики физического моделирования и комплекса показателей, отражающих математическими зависимостями движение сырьевых материалов из бункера БЗУ и распределение их по окружности и сечению доменной печи; создании научных основ целевого формирования слоёв агломерата, окатышей и добавочных материалов в бункере БЗУ и в колошниковом пространстве печей в зависимости от решаемой задачи по воздействию на лимитирующие зоны и процессы; разработке конкретных приёмов повышения производительности, сокращения потребления кокса, снижения содержания серы в чугуне, удаления настыли от футеровки, формирования защитного гарнисажа на футеровке, уменьшения потерь железа воздействием на лимитирующие зоны и процессы; определении режимов локальной загрузки промывочных материалов (марганцевая, кремнеземо-марганцовистая руды, конвертерный шлак), обеспечивающих рациональную очистку зон горна с наилучшей дренажной способностью коксовой насадки, для энерго- и ресурсосбережения при работе доменной печи; выявлении рационального уровня корректируемых технологических параметров в зависимости от их некорректируемых видов, состояния лимитирующих зон и процессов.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 78 научных трудов, из них 32 публикации в рецензируемых журналах (10 статей – в журналах, индексируемых в международных базах Web of Science, Scopus и 22 статьи – в журналах из перечня, рекомендованного ВАК РФ), 1 монография, 1 патент РФ на изобретение, 5 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 6-ти глав, заключения, списка использованной литературы из 517 наименований и приложений (акты внедрения результатов исследований). Она изложена на 434 странице машинописного текста, содержит 69 рисунков и 140 таблиц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введение** показана актуальность исследований, направленных на совершенствование работы доменных печей, оснащённых бесконусными загрузочными устройствами лоткового типа (БЗУ), как в условиях нормативного уровня ограничивающих параметров, так и в особых ситуациях, обусловлен-

ных состоянием агрегатов и свойствами используемых шихтовых материалов. Сформулированы цель и задачи исследования, научные положения, выносимые на защиту, изложена научная новизна, теоретическая значимость и практическая ценность работы. Приводятся сведения об апробации работы, достоверности полученных результатов, личном вкладе автора.

**В первой главе** рассмотрено развитие металлургии чёрных металлов на период 2014-2030 гг. Доказана важность изучения как процессов доменной плавки в отдельности, так и взаимосвязей этих процессов в интерактивной системе их осуществления. Интерактивная система представлена как совокупность взаимосвязанных средств подготовки к новому технологическому режиму, его испытания в разных вариантах, сопровождения, закрепления в технологической инструкции и внедрения с целью энергоресурсосбережения: снижения удельного расхода кокса, повышения производительности и длительности работы между ремонтами, улучшения качества чугуна. При этом иные цели (например, синхронизация работы доменных печей и агломерационных фабрик, доменных печей и сталеплавильных агрегатов и т. д.) также признаются существенными, но при создании технологических решений отнесены к ограничениям. Совершенствование работы доменных печей рассматриваем как позитивное изменение технологии выпускаемой продукции. Обозначены важные задачи улучшения работы:

- совершенствование регламента выплавки металла;
- повышение надёжности оценок определяющих процессов в лимитирующих зонах;
- подготовка исполнителей новых приёмов (трудового коллектива).

Показано, что для достижения цели работы достаточно рассматривать технологию как совокупность воздействий с целью получения чугуна требуемого качества в необходимом количестве при рациональном использовании предоставленных ресурсов. Объектом совершенствования могут быть как отдельные компоненты режимов, характеризующих технологию, так и совокупность их. Для повышения надёжности и минимизации затрат времени на поиск решения интерактивная система предусматривает физическое и математическое моделирование.

Анализ подходов различных исследователей к совершенствованию доменной плавки показывает, что использование интерактивной системы в представляемом виде не зависит от вида сырья и выплавляемого чугуна. Особенности работы печей будут отражены в математических взаимосвязях и ограничениях. В качестве действенных элементов при этом могут быть детерминированные модели, уравнения регрессии и искусственные нейронные сети.

Исходя из изложенных принципов, сформирована цель, определены задачи, обоснованы направления исследований.

**Во второй главе** представлены результаты физического и математического моделирования совместного поступления компонентов железорудного сырья и добавочных материалов из бункера БЗУ лоткового типа в колошник-

ковое пространство доменной печи для построения интерактивной системы. Даны основные положения методологии, выявлены закономерности, позволяющие размещать составляющие шихты по видам, руководствуясь местом расположения определяющих процессов и зон в печи.

Физическое моделирование проводили с применением схемы трехфакторного плана Бокса-Бенкена, полного двухфакторного плана. Обработывали данные дисперсионным, каноническим и регрессионным методами анализа, в последнем из которых применили множественную регрессию в линейном и нелинейном вариантах.

Рассмотрено действие следующих факторов на распределение материалов по окружности и сечению доменной печи:

- Расходные характеристики компонентов шихты:
  - содержание окатышей в интервале 10-90% от железорудной части шихты;
  - расход коксового орешка в интервале 0-6% от массы материалов, загружаемых в бункер БЗУ;
  - расход промывочных материалов (марганцевая и железная руды, обладающие необходимыми свойствами) в интервале 0-13%.
- Содержание фракции -5 и -10 мм в агломерате в интервале 1-18%.
- Последовательность набора компонентов шихты в бункер БЗУ.
- Степень заполнения бункера БЗУ.
- Угол открытия шихтового затвора в интервале 35-60 град для выпуска материалов из шихтового бункера БЗУ.

Дисперсионным анализом выявили источники неравномерного распределения железорудной шихты, загружаемой в доменную печь. Наиболее существенное действие оказывала крупность материалов. Средние доли влияния для агломерата и окатышей составляли соответственно 0,71 и 0,62. Остальное приходилось на распределение массы по порциям и эффект взаимодействия двух переменных.

В оценку закономерностей поступления компонентов шихты из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи включили показатели равномерности движения шихты по массе  $K_{кш}$  и крупности  $P_k$ :

$$K_{кш} = 1 - \frac{\sigma_i}{KO_{кш}}, \quad (1)$$

где  $\sigma_i$  – среднеквадратическое отклонение по массе  $i$ -х порций соответствующего материала, поступающего из шихтового бункера;  $KO_{кш}$  – средняя величина массы порций, поступающих из бункера.

$$P_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{f_{экр}}{f_{срв}} \right)_i - \sigma \left( \frac{f_{экр}}{f_{срв}} \right)_i, \quad (2)$$

где  $f_{экр}$ ,  $f_{срв}$  – эквивалентная по поверхности и средневзвешенная крупности порций шихты, поступающих из бункера;  $n$  – число порций;  $\sigma_i$  – среднеквадратическое отклонение однородности  $i$ -х порций шихты по крупности  $(f_{экр}/f_{срв})$ , поступающих из бункера.

Показатель равномерности движения шихты по крупности учитывает однородность шихты по крупности  $O_{ш}$  и равномерность ее распределения по порциям  $K_{ш}$ :

$$O_{ш} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{f_{экр}}{f_{срв}} \right)_i, \quad (3)$$

$$K_{ш} = 1 - \sigma \left( \frac{f_{экр}}{f_{срв}} \right)_i \cdot n \sum_{i=1}^n \left( \frac{f_{срв}}{f_{экр}} \right)_i. \quad (4)$$

Исследования по физическому моделированию провели на установке бесконусного загрузочного устройства лоткового типа, которая оснащена скиповой системой загрузки. Модель изготовлена в масштабе 1 : 5 загрузочных устройств в доменных печах № 2, 4 и 6 ПАО «ММК».

При моделировании наблюдали равенство критерия Ньютона для реальной печи  $Ne_{дп}$  и модели  $Ne_M$ .

По результатам исследований получены следующие зависимости содержания агломерата фракции 1-5 мм по ходу выпуска при различных режимах загрузки:

$$A_{1-5}^n = 5,7 - 0,67 \cdot e^{\tau_{\phi n}} - \frac{0,05 \ln(\tau_{\phi n})}{\tau_{\phi n}^2}, R^2 = 0,99; \quad (5)$$

$$A_{1-5}^H = \tau_{\phi n}^{1,88} e^{-4,21-2,5210^{-2}\tau_{\phi n}}, R^2 = 0,99; \quad (6)$$

$$A_{1-5}^c = 7,8 + 8,3\tau_{\phi n}^2 \cdot \ln(\tau_{\phi n}) - \frac{0,689}{\tau_{\phi n}}, R^2 = 0,98; \quad (7)$$

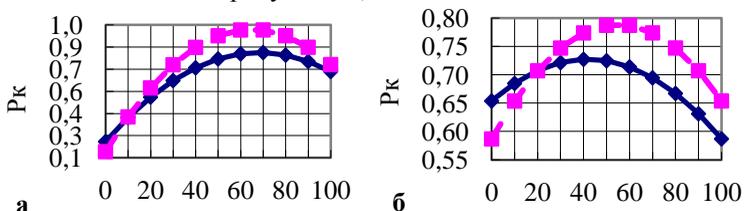
$$A_{1-5}^m = 5,5 - 2,21 \cdot 10^{-5} \tau_{\phi n}^2 \ln(\tau_{\phi n}) + 3,53 \cdot 10^7 e^{-\tau_{\phi n}}, R^2 = 0,93; \quad (8)$$

где  $A_{1-5}^n$   $A_{1-5}^H$   $A_{1-5}^c$   $A_{1-5}^m$  – содержание агломерата фракции 1-5 мм по ходу выпуска при загрузке его соответственно под фракцией +10 мм, над фракцией +10 мм, в середину слоя фракции +10 мм и загрузке фракции +10 мм в середину слоя класса -10 мм;  $\tau_{\phi n}$  – доля времени формирования порции от общей продолжительности выпуска (в пределах 0-100%).

Полученные результаты указывают на целесообразность расположения в бункере материала с более высокой эквивалентной по поверхности крупностью в слое материала с меньшей крупностью (рисунок 1).

В периоды промышленных исследований повышенную эквивалентную по поверхности крупность по сравнению с агломератом имели окатыши и добавочные материалы. При размещении окатышей в бункере БЗУ в середине массы агломерата наблюдали наиболее высокий показатель равномерности по крупности. Согласно полученному уравнению (9) при содержании окатышей 38% от расхода железорудной части шихты показатель  $P_{к(ЖРС)}$  составлял 0,90. Такой режим загрузки обеспечивал наименьшее отклонение отношения эквивалентной по поверхности крупности железорудных материалов по мере истечения их из бункера БЗУ от исходной ее величины (рису-

нок 2, а). При этом содержание окатышей характеризовалось наличием экстремума в соответствии с рисунком 2, б.

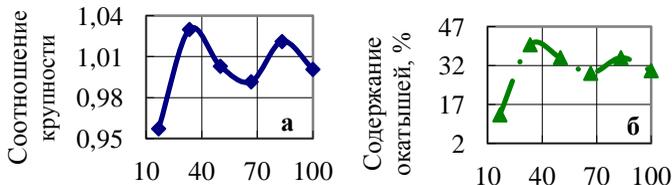


Доля агломерата фракции +10 мм в слое класса (-10) мм (—■—) и агломерата фракции (-10) мм в слое класса (+10) мм (—●—)

Рисунок 1 – Изменение показателя равномерности по крупности в зависимости от режимов загрузки при доле перемещаемой фракции 10 (а) и 50 % (б)

$$P_{k(ЖРС)} = 0,959 + 0,159A_{доб} + 0,22 \ln(D_{ок}) - 0,383A_{доб}^2 + 0,096 \cdot [\ln(D_{ок})]^2 - 0,264A_{доб} \ln(D_{ок}) + 0,182A_{доб}^3 + 0,016[\ln(D_{ок})]^3 - 0,043A_{доб}[\ln(D_{ок})]^2 + 0,133A_{доб}^2 \ln(D_{ок}), \quad (9)$$

где  $A_{доб}$  – доля агломерата, располагающегося под добавочными материалами в шихтовом бункере БЗУ, (в пределах 0-1);  $D_{ок}$  – доля окатышей в шихте (в пределах 0,1-0,9) от расхода железорудного сырья.



Доля времени формирования порции от общей продолжительности выпуска, %

Рисунок 2 – Характеристики поступления материалов из бункера БЗУ при загрузке окатышей в него, располагая в середине слоя агломерата

Увеличение содержания фракции 1-5 мм в агломерате в интервале от 1 до 10% при одновременном росте фракции -10 мм от 10 до 90% за счет снижения доли агломерата крупностью +10 мм незначительно влияло на перераспределение агломерата фракции -5 мм в сформированных по ходу выпуска порциях. Средняя величина показателя равномерности составляла 0,88. Увеличение содержания фракции 1-5 мм до 18% снижало величину показателя равномерности от 0,88 до 0,62 за счет преимущественного поступления мелкой фракции во второй половине выпуска. В связи с этим превышение содержания фракции (-5) мм границы в 10% будет отрицательно сказываться на газодинамике доменного процесса в отдельных секторах печи и, следовательно, сопровождаться ухудшением технико-экономических показателей.

Изучением зависимости поступления окатышей по ходу выпуска при односторонней загрузке железорудных материалов в бункер БЗУ получили уравнение:

$$O_{\kappa} = \frac{(1 - th(0,375\tau_{\phi n} - 25))}{2} \cdot \frac{1}{2} \left[ (1 - th(\tau_{\phi n} / 2 - 25)) \cdot O_{\kappa_1} + (1 + th(\tau_{\phi n} / 2 - 25)) \cdot \right. \\ \left. + \frac{(1 + th(0,375\tau_{\phi n} - 25)) \cdot O_{\kappa_2}}{2}, \right. \\ \left. + \frac{(0,06 \cdot \tau_{\phi n} - 2,99) \cdot O_{\kappa_4} + (3,99 - 0,06 \cdot \tau_{\phi n}) \cdot O_{\kappa_3}}{2} \right] + \quad (10)$$

где  $O_{\kappa_{1,2,3,4}}$  – содержание окатышей от суммарной массы материалов в формируемой по ходу выпуска порции за долю времени  $\tau_{\phi n}$ ;  $\tau_{\phi n}$  – доля времени формирования порции от общей продолжительности выпуска (в интервале 0-100%);  $th$  – гиперболический тангенс:  $th = (e^{2x} - 1) / (e^{2x} + 1)$ .

Разработаны математические модели определения рациональных режимов загрузки шихтовых материалов в колошниковое пространство доменной печи на основе расчетов коэффициентов равномерности и однородности по видам и крупности компонентов шихты. Наиболее высокую величину показателя равномерности поступления железорудных материалов по массе обеспечивала следующая последовательность загрузки компонентов шихты в бункер БЗУ: на дно шихтового бункера 25 % агломерата, затем окатышей с добавочными материалами, далее загрузка оставшихся 75 % агломерата. При содержании окатышей 30-38% от расхода ЖРС величина показателя равномерности железорудных материалов превышала 0,75 (рисунок 3).

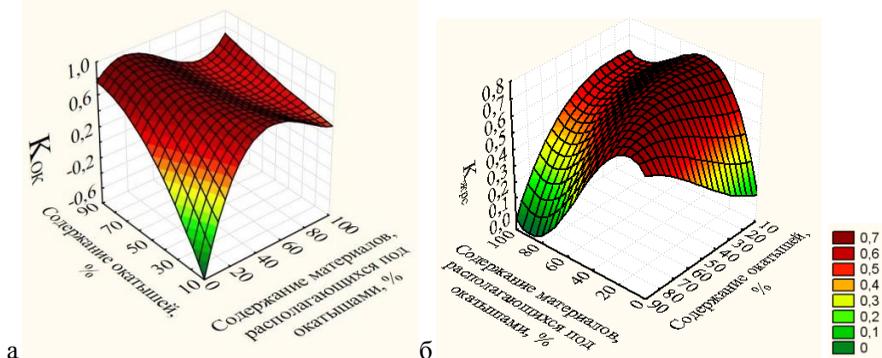


Рисунок 3 – Зависимость показателя равномерности поступления окатышей (А) и железорудных материалов (Б) в колошниковое пространство печи от параметров загрузки

Усовершенствована математическая модель, разработанная в ФГБОУ ВО «МГТУ им Г.И. Носова», описывающая распределение железорудного сырья и кокса по радиусу печи, путем интегрирования в нее полученных уравнений, описывающих загрузку смеси железорудного сырья в колошниковое пространство печи. Разработан интерфейс, включающий диалоговое окно с условиями загрузки и результатами моделирования. В том числе представлено

определение расчетных параметров по сечению колошника: абсолютные величины рудной нагрузки, степень уравнивания шихты подъемной силой газового потока, коэффициент сопротивления шихты движению газа.

**В третьей главе** представлены результаты исследований по коэффициенту, отражающему соответствие технологическому регламенту распределения шихтовых материалов и газов по окружности печей, для построения интерактивной системы. Разработана и предложена методика определения относительной неравномерности распределения материалов и газов по окружности печи на основе  $X^2$ -статистики согласно зависимостям (11)-(13).

$$X^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(n_i - \bar{n})^2}{n} = \sum_{i=1}^N \frac{(n_i - n/N)^2}{n/N} = \frac{N}{n} \sum_{i=1}^N (n_i - \frac{n}{N})^2. \quad (11)$$

Откуда очевидна связь

$$V^2 = \frac{N^2}{n^2(N-1)} \sum_{i=1}^N (n_i - \frac{n}{N})^2 = \frac{N}{n(N-1)} X^2 \quad (12)$$

$$\text{или} \quad X^2 = \frac{n(N-1)}{N} V^2. \quad (13)$$

Установлено, что для использования  $X^2$ -статистики измерений температуры газа по окружности печи необходимо корректировать, минимизируя значения  $X^2$  до верхней  $\alpha$ -квантили  $\chi_k^2(\alpha)$  на заданном уровне значимости  $\alpha = 1 - p$  при  $k=N-1$  степенях свободы. Предлагается ввести понятие квантильного множителя  $q$  для корректировки  $X^2$ , с помощью которого достигается  $q \cdot X_{\max}^2 \approx \chi_k^2(\alpha)$ , где  $\chi_k^2(\alpha)$  – верхняя  $\alpha$ -квантиль, устанавливаемая для отклонения  $H_0$ - гипотезы на уровне значимости  $\alpha$  при условии, если  $q \cdot X^2 = X_{\text{кор}}^2 \geq \chi_k^2(\alpha)$ . Тогда  $q \cdot X^2 = X_{k,p}^2 \Rightarrow p = p(\chi_{k,p}^2)$ , где  $\chi_{k,p}^2$  – внутренняя квантиль для определения показателя  $P$  (относительная неравномерность  $p < 1 - \alpha$ ).

Таким образом, в качестве меры окружной неравномерности для получаемой величины  $\chi_k^2$ , используя закон ее распределения, предлагается находить уровень вероятности  $P$ , то есть коэффициент окружной неравномерности  $p = p(\chi_k^2)$ ,  $p \in (0;1)$ ,  $\chi_k^2 = X_{\text{кор}}^2 = q \cdot X^2$ .

Методика оценки соответствия распределения материалов и газов по окружности доменной печи технологическому регламенту на основе теории статистики апробирована на доменных печах ПАО «ММК» объемом 1370 и 2014 м<sup>3</sup>.

Разработаны режимы доменной плавки, обеспечивающие энергоресурсосбережение понижением коэффициента окружной неравномерности распределения температуры периферийных газов, вычисленного по разработанной методике. Для этого наряду с физическим и математическим моделированием проводили опытные плавки в производственных условиях по воздействию режимами загрузки и параметрами дутья на лимитирующие зоны и

процессы. Изменяли последовательность загрузки железорудных материалов и коксового орешка в бункер БЗУ при использовании односкиповой и двухскиповой режимов загрузки. Стабилизировали отношение расходов природного газа и дутья по фурмам путем регулирования расхода газа по фактическому количеству дутья, поступающему через соответствующую фурму.

Исследованием девятнадцати пар периодов длительностью по 7-9 суток на доменных печах № 2, 4, 6 и 9 ПАО «ММК» установили, что уменьшению коэффициента окружной неравномерности распределения температур  $r_1$  периферийных газов в верхней части шахты с 0,77 до 0,34 соответствовало повышение показателя равномерности поступления компонентов шихты из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи с 0,30 до 0,71. На каждые 10% уменьшения коэффициента приходилось увеличение производительности печей в среднем 0,22%, понижение удельного расхода кокса 0,41% (таблица 1).

Таблица 1 – Техничко-экономические показатели работы доменных печей № 2,4,6 и 9 ПАО «ММК» при различных режимах загрузки

Режим загрузки окатышей и добавочных материалов в бункер БЗУ	Показатель равномерности $K_{жрс}$	$r_1$	Удельная производительность, т/(м <sup>3</sup> ·сут)	Удельный расход кокса, кг/т чугуна
На дно	0,30	0,77	2,62	462,1
Наверх	0,62	0,46	2,65	458,0
Вперемешку	0,70	0,39	2,66	456,7
В слой агломерата между его порциями, содержащими 25 и 75; 17 и 83; 50 и 50; 75 и 25 %	0,71	0,34	2,67	454,4

Установили взаимосвязь коэффициента неравномерности распределения материалов и газов по окружности печи с показателями хода процессов: газодинамический режим, интенсивность по дутью, газу и шихтовым материалам, восстановление железа из оксидов и тепловая работа печи по зонам.

Понижение коэффициента неравномерности распределения температур по окружности печи на 41% в результате перехода на разработанный рациональный режим загрузки сопровождалось ростом коэффициента сопротивления шихты движению газового потока в верхней части на 5,1%, уменьшением скорости газа на 3,1%, его динамического напора на 4,44 % (таблица 2).

Процессы восстановления и теплообмена смещались в зону умеренных температур. Уменьшилась степень восстановления Fe из FeO углеродом на 2,3% отн. при повышении водородом и монооксидом углерода соответственно на 1,7 и 1,3% отн (таблица 3). Увеличивалось соотношение теплоемкостей потоков шихты и газа в верхней части печи в среднем на 0,022.

В направлении смещения процессов восстановления и теплообмена в зону умеренных температур действовало понижение коэффициента неравномерности распределения отношений расходов природного газа и дутья по фурмам от 0,34 до 0.

Таблица 2 – Изменение показателей газодинамического режима (% отн.) доменных печей № 4, 6, 9 при различных режимах загрузки

Наименование показателей	Изменение режима загрузки добавочных материалов в бункер БЗУ		
	низ→слой	низ→верх	верх→слой
Изменение степени уравнивания шихты подъёмной силой газового потока	-5,16	-3,17	-0,66
Изменение скорости газа в рабочих условиях по температуре и давлению: в верхней части печи в нижней части печи	-3,96 -1,42	-1,17 -0,52	-2,18 0,17
Изменение динамического напора газа в рабочих условиях по температуре и давлению: в верхней части печи в нижней части печи	-5,25 -3,24	-1,15 -1,32	-3,63 -0,74
Изменение коэффициента сопротивления шихты движению газа: в верхней части печи в нижней части печи	4,93 5,01	-1,02 0,44	5,19 -4,43

Таблица 3 – Изменение показателей химического и теплового взаимодействия потоков шихты и газа (% отн.) при различных режимах загрузки

Наименование показателей	Изменение режима загрузки добавочных материалов в бункер БЗУ		
	низ→слой	низ→верх	верх→слой
Изменение степени восстановления Fe из FeO различными восстановителями, %: C CO H <sub>2</sub>	-3,52 1,63 1,89	-2,51 0,91 1,15	-1,10 0,92 1,48
Изменение соотношения теплоёмкостей потоков шихты и газа: в нижней части печи (с температурами более 850 °С) в верхней части печи (с температурами менее 850 °С)	1,94 1,67	0,26 0,34	1,52 0,83

Повышение показателя равномерности поступления коксового орешка из бункера БЗУ в колошниковое пространство доменной печи № 4, рассчитанного по зависимости (1), от -1,2 до 0,74 сопровождалось улучшением фильтрующей способности коксовой насадки в горне печи. Количество остающегося в печи шлака сократилось с 18,1 до 16,0 т, его вязкость снизилась с 0,56 до 0,52 Па·с. Это обеспечило увеличение коэффициента замены им кокса с 0,68 до 0,88 кг/кг. Повышением окружной равномерности распределения коксового орешка при использовании двухскиповой загрузки шихтовых материалов в бункер БЗУ доменной печи № 2 получили рост коэффициента замены кокса орешком с 0,68 до 0,91 кг/кг.

**В четвёртой главе** представлены научные основы формирования слоёв агломерата, окатышей и добавочных материалов в бункере БЗУ и в колошниковом пространстве печей, обеспечивающие повышение производительности, сокращение потребления кокса и требуемое качество металла при повышенной стойкости футеровки для различных условий процесса.

Промышленные исследования проведены на доменных печах № 2, 4, 6, 9, 10 ПАО «ММК», оснащенных БЗУ лоткового типа. Изучили как смежные периоды малой длительности 7-9 суток, так и большой – до 700 суток. Рассмотрено действие ряда параметров: доля нефлюсованных окатышей от расхода железорудной части шихты, размер колоши, уровень засыпи, угловые станции лотка.

При сохранении прежней матрицы загрузки на исследуемых печах повышение доли окатышей на каждые 5 % в интервале от 26 до 55 % сопровождалось ростом содержания CO<sub>2</sub> на периферии и в рудном гребне и понижением в центре согласно таблица 4 и рисунок 4.

Таблица 4 – Изменение показателей работы доменных печей, характеризующих распределение материалов и газа по радиусу, при увеличении доли окатышей на 5% в интервале от 26 до 55%

Мероприятия	Изменение
Содержание CO <sub>2</sub> в радиальном газе, %: на периферии в рудном гребне в центре	+0,6 +0,7 -1,1
Температура радиального газа, °C: на периферии в рудном гребне в центре	-4 -5 +2
Температура газа на периферии в шахте печи, °C	-13
Температура в газоотводах, °C	-3

Установили, что рост содержания окатышей на 1% в интервале их содержания 30-60% от железорудной части шихты сопровождался повышением температуры холодильников шахты в среднем на 1,1 °C (рисунок 5).

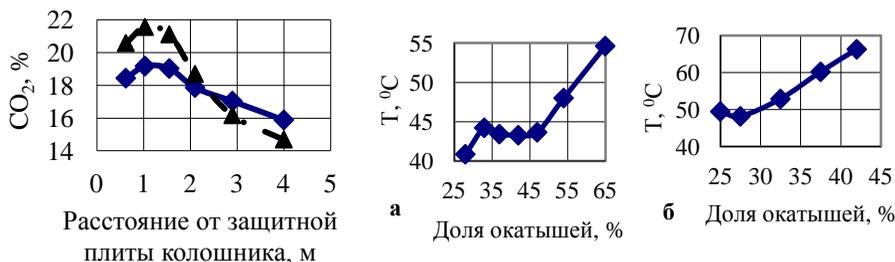


Рисунок 4 - Содержание CO<sub>2</sub> по радиусу доменной печи ПАО «ММК» при доле окатышей 28 % (сплошная линия) и 37 % (пунктирная)

Рисунок 5 - Изменение температур холодильников шахты доменных печей ПАО «ММК» при увеличении доли окатышей

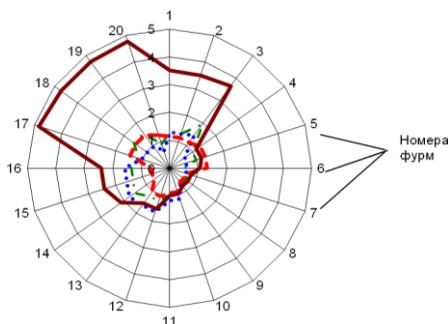


Рисунок 6 – Плотность теплового потока по внутренним виткам холодильников 6-го ряда шахты, тыс. ккал/(м<sup>2</sup>·час) при работе доменной печи с долей окатышей от ЖРС 50 % длительностью 4 месяца ( — ) и с долей окатышей 30-35 % в плеллествиюние 5 месяцев

шихты в бункер БЗУ. Поступлению окатышей в периферийную часть печи способствовало расположение их в нижней части бункера БЗУ под агломератом и выгрузка в колошниковое пространство при изменении углового положения лотка относительно вертикали от периферии к центру. Переход на такой режим загрузки улучшал газопроницаемость периферийной зоны печи, что сопровождалось повышением количества газа, проходящего через пристеночную зону.

Загрузка окатышей в бункер БЗУ после агломерата обеспечивала максимальное поступление окатышей в колошниковое пространство печи во второй половине выпуска, что сопровождалось повышением степени использования СО в зоне рудного гребня и центральной части печи (рисунок 7).

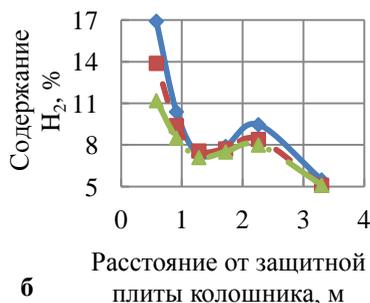
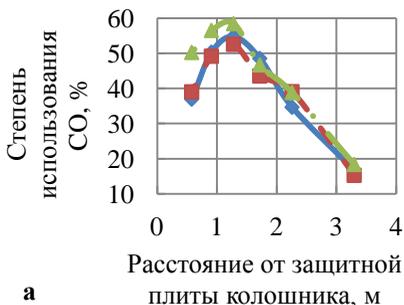


Рисунок 7 – Параметры колошникового газа доменной печи ПАО «ММК» при размещении в бункере БЗУ окатышей над агломератом ( —◆— ), под ним ( —■— ) и между слоями ( —▲— )

Размещение окатышей в бункере БЗУ между слоями агломерата в количестве 25 и 75, расположенными в бункере БЗУ соответственно под и над окатышами согласно физическому моделированию, обеспечивало равномерное поступление компонентов шихты из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи, что сопровождалось увеличением степени использования газа СО и уменьшением содержания  $H_2$  на периферии и в зоне рудного гребня (рисунок 7).

В среднем переход с режима загрузки окатышей «на дно бункера БЗУ» на режим загрузки их «в слой агломерата» сопровождался повышением степени использования СО с 40,5 до 42,0 % и водорода с 43,4 до 44,7%.

Для сохранения стойкости холодильников футеровки проведены промышленные опробования специальных режимов загрузки доменных печей № 2, 4, 6, 9 ПАО «ММК». Переход на разработанный рациональный режим загрузки на доменной печи № 4, при одновременном увеличении доли окатышей в шихте от 38 до 45%, предотвратил возможное увеличение температуры холодильников шахты, распара и заплечиков на 7,7 °С (таблица 5). Работа доменных печей № 6, 9 длительностью два месяца при доле окатышей 38 – 41 % с использованием режима загрузки, отдаляющего окатыши от футеровки, способствовало сохранению стойкости системы охлаждения шахты, распара и заплечиков в следствии понижения их средних температур на 6,3 °С.

Таблица 5 – Основные технологические показатели работы доменных печей № 9 и № 4

Наименование показателей	Содержание окатышей в пристеночной зоне колошника по отношению к железорудному сырью, %			
	66	15	63	30
Номер доменной печи	9		4	
Доля окатышей от ЖРС, %	38	38	38	45
Удельный расход кокса, кг/т чугуна	474,4	474,3	490,7	489,0
Производительность, т/сут	3983	4026	3290	3325
Средняя температура холодильников шахты 1-4 рядов, °С	49,8	46,2	42,2	43,0
Среднее значение градиентов температур холодильников шахты по высоте	48	46	41	43
Среднее значение градиентов температур холодильников по окружности	52	47	108	118

На доменных печах № 2, 4 ПАО «ММК» разработали и обосновали рациональные параметры технологических режимов на основе введения в состав шихты титаномагнетитовой руды, обеспечивая устранение искажения рабочего профиля горна. Для выявления наиболее эффективного режима использования титаносодержащей руды провели лабораторные исследования на физической модели БЗУ по моделированию различным режимов её загрузки в колошниковое пространство печи. При промышленном испытании разрабо-

танных режимов обеспечили уменьшение текущих тепловых нагрузок на системы охлаждения печей в среднем на 14,8 %.

На доменной печи № 2 провели промышленные опробования специальных режимов загрузки для ускоренного истирания настыли в шахте печи. Работа печи на разработанном рациональном режиме загрузки, обеспечивающем поступление окатышей в пристеночную зону колошника, с доведением доли окатышей до 50-55% в течение 6 месяцев сопровождалась уменьшением толщины настыли в шахте на 60-100 мм. Рост производительности составил 35% при понижении удельного расхода кокса более чем на 50 кг/т чугуна.

Факторным анализом оценили влияние параметров загрузки и дутья на газодинамические характеристики доменного процесса и технико-экономические показатели работы печи, работающей с верхней определяющей зоной по силовому взаимодействию потоков шихты и газа из-за наличия настыли на футеровке печи. Модели некоторых целевых откликов с оценкой коэффициента детерминации  $R^2$ , ошибки уравнения  $\varepsilon$  и F-статистика Фишера в сравнении с табулированной статистикой на уровне значимости 0,05 для оценки адекватности модели приведены ниже:

$$II = 3703 - 52,5F_1 + 259,3F_2 + 34,2F_3 + 22,1F_6, \quad (14)$$

$$R^2 = 0,80; \varepsilon = 134,8; F(4,172) = 173,7 >> F_{\text{табл}} = 2,42,$$

$$\nu = 15,5 - 1,56F_1 + 0,5F_2 + 0,17F_3 - 0,5F_4, \quad (15)$$

$$R^2 = 0,72; \varepsilon = 1,1; F(4,172) = 108,5 >> F_{\text{табл}} = 2,42,$$

$$\lambda_{\text{ув}} = 0,68 - 0,103F_1 - 0,015F_2 - 0,05F_4 - 0,027F_6, \quad (16)$$

$$R^2 = 0,67; \varepsilon = 0,08; F(4,172) = 89,9 > F_{\text{табл}} = 2,42,$$

где  $F_1$  – параметр, характеризующий загрузку железорудного сырья (ЖРС) на станции углового положения лотка №11-9 и 5-3 (от периферии к центру);  $F_2$  – интенсивность загрузки ЖРС, расход дутья и природного газа;  $F_3$  – крупность ЖРС;  $F_4$  – доля окатышей в железорудном сырье;  $F_5$  – основность железорудного сырья;  $F_6$  – параметр, характеризующий загрузку ЖРС на станции углового положения лотка № 8-6 и кокса на станции № 2-1 (от периферии к центру).

В условиях работы печи с настылью в шахте положительное действие на газодинамику процесса оказывало уменьшение содержания ЖРС у футеровки от 100 до 67% за счет увеличения его в рудном гребне с 48 до 51% и промежуточной зоне с 37 до 39%. Устойчивость работы доменной печи при наличии настыли в шахте обеспечили снижением степени уравнишивания опускающихся материалов подъёмной силой газового потока на 5,16%, коэффициента сопротивления шихты в нижней части печи на 9,47% и в верхней на 27,94% относительно своих средних эксплуатационных уровней.

**В пятой главе** представлены рациональные параметры загрузки многокомпонентной шихты и использования комбинированного дутья, обеспечивающие необходимое распределение материалов и газов по окружности ко-

лошника для энергоресурсосбережения при определяющей роли газодинамических условий в верхней части доменных печей.

На газодинамику верха положительное влияние оказывала загрузка коксового орешка в зону рудного гребня по разработанному режиму, обеспечивающему поступление его из бункера БЗУ с показателем равномерности, вычисленным по формуле (1), равным 0,72-0,74. Повышение равномерности распределения кокса фракции 10-25 мм в колошниковом пространстве печей № 4, 6, 9 ПАО «ММК» в количестве 11,6 кг/т чугуна сопровождалось снижением коэффициента сопротивления шихты движению газового потока в верхней части их на 7,1 %, увеличением интенсивности теплообмена в зоне с температурами менее 850 °С на 2,3%.

Рациональное распределение коксового орешка в колошниковом пространстве печей создавало благоприятные условия для снижения расхода кокса увеличением потребления природного газа. На каждые 10 кг/т чугуна применяемого орешка увеличение расхода газа на 400 м<sup>3</sup>/ч осуществляли без осложнения газодинамического режима плавки. В исследуемых периодах удельный расход кокса уменьшили на 9,4 кг/т чугуна.

Преимущества используемого коксового орешка в составе шихты доменных печей ПАО «ММК» по сравнению со скиповым коксом заключались в более высокой холодной прочности, повышенной реакционной способности (таблица 6).

Таблица 6 – Физико-химические и физико-механические свойства кокса по фракциям

Показатели	Фракции кокса, мм				
	10-25	25-40	40-60	60-80	>80
Структурная прочность кокса, %:					
- сухого тушения	86,2	86,9	80,5	79,7	77,5
- мокрого тушения	85,5	86,1	78,9	77,6	75,8
Реакционная способность кокса по					
CRI, %: - сухого тушения	30,7	29,0	29,5	30,0	30,3
- мокрого тушения	32,1	30,5	31,1	31,5	31,7

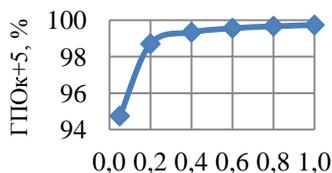
На основе рассмотрения различия горячей прочности железорудных материалов, используемых в составе шихты доменных печей (агломерата 50-57%, окатышей – 70-95%) разработана энерго- и ресурсосберегающая технология локальной загрузки шихтовых материалов в колошниковое пространство, обеспечивающая снижение напряженности по силовому взаимодействию потоков шихты и газа в верхней части шахты. Она опробована на доменных печах № 2 и 4 ПАО «ММК», работающих с верхней определяющей по газодинамике зоной.

Для реализации усовершенствованной технологии увеличили долю агломерата, поступающего в зону рудного гребня, с 45 до 70% при понижении его содержания на периферии путем увеличения в ней доли окатышей. Этим уменьшили коэффициент сопротивления шихты в верхней части печей на

12,1% (таблица 7) за счет снижения разрушения железорудного материала у поверхности слоя шихты в печи и переноса места разрушения в область шахты с большим сечением по сравнению с колошником, что подтверждается изменением сопротивления годных окатышей и агломерата удару при их нагреве до 600 °С в условиях изменения объемной доли ЖРС (рисунок 8).

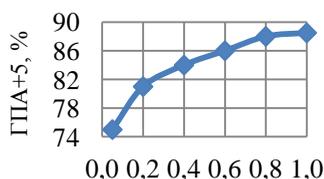
Таблица 7 – Техничко-экономические показатели работы доменной печи ПАО «ММК» при использовании разработанного режима загрузки

Наименование показателей	Доля агломерата в рудных скипах, содержащее которых поступало в пространство, соответствующее 2/3-2/5 радиуса колошника от его центра, %		
	45	60	70
Удельный расход кокса, кг/т чугуна	469,8	468,4	465,2
Производительность, т/сут	3633	3635	3641
Интенсивность хода: по дутью, м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> ·мин	2,28	2,38	2,39
по суммарному углероду т/м <sup>3</sup> ·сутки	1,03	1,02	1,01
Коэффициент сопротивления шихты движению газов на колошнике	1,99	1,84	1,72



**а**

Объемная доля ЖРС



**б**

Объемная доля ЖРС

Рисунок 8 – Зависимость сопротивления годных окатышей (а) и агломерата (б) удару от объемной доли железорудного сырья при температуре нагрева 600 °С

Повышение таким путём газопроницаемости шихты в верхней части печей позволило увеличить интенсивность хода по дутью на 4,8% и уменьшить уровень засыпи с 1,6 до 1,5 м без ухудшения газодинамических параметров. Эффективная организация доменного процесса путем использования рационального режима загрузки окатышей и агломерата сопровождалась повышением степени использования СО и Н<sub>2</sub> соответственно на 1,1 и 2,5 % абс., что позволило уменьшить удельный расход кокса на 3,7 кг/т чугуна.

В качестве одного из направлений уменьшения взаимного сопротивления потоков шихты и газа их движению в верхней части печи рассмотрели уменьшение варьирования температуры агломерата. Исследованиями на доменной печи № 6 ПАО «ММК» получили, что уменьшение среднеквадратического отклонения температуры агломерата, загружаемого в печь, от 19,0 до 5,0°С снижает коэффициент окружной неравномерности распределения тем-

ператур в верхней части шахты (определяемой по разработанной методике) на 0,05. Это позволило увеличить потребление природного газа на 500 м<sup>3</sup>/ч, повысить степень использования СО на 2,8% отн. и Н<sub>2</sub> на 1,0% отн., понизить удельный расход кокса на 3,9 кг/т чугуна.

**В шестой главе** представлены исследованные способы снижения удельного расхода кокса и повышения производительности доменных печей воздействием на параметры загрузки и дутья при определяющей роли дренажной способности коксовой насадки в горне.

Использование на доменных печах кокса низкого качества, мелких его фракций, высокоосновного агломерата способствует загромождению горна печи спелью и мелочью кокса, тугоплавкими силикатами кальция, что ухудшает условия дренажа продуктов плавки через слой кокса в горне печи. В связи с этим на доменных печах № 2 и 6 ПАО «ММК» исследованием 37 смежных пар периодов длительностью по 7-9 суток оценили изменение фильтрующей способности коксовой насадки в горне и показатели их работы при различных режимах загрузки промывочных материалов в локальные зоны горизонтального сечения колошника. Загрузку марганцевой руды, комплексного кремнеземо-марганцовистого материала, конвертерного шлака осуществляли на периферию, в зону рудного гребня, к осевой зоне, в промежуточные зоны колошника и равномерно по радиусу.

Установлена целесообразность использования локального режима загрузки промывочных материалов в колошниковое пространство. Переход на способ загрузки промывочных материалов в зону рудного гребня и периферийную часть доменных печей № 2 и 6 от равномерного ее распределения по радиусу колошника сопровождался улучшением показателей дренажной способности коксовой насадки в горне. Вязкость шлака снизилась от 0,56 до 0,49 Па·с, количество шлака, остающегося в горне печи после выпуска продуктов плавки, уменьшилось от 20,4 до 17,10 т, растворимость углерода в чугуне снизилась от 95,9 до 94,75%. Производительность печей повысилась от 3215 до 3249 т/сут.

Рациональный режим загрузки марганцевой руды зависел от качества кокса. Установили, что загружать промывочные материалы к осевой зоне целесообразно при работе на коксе с горячей прочностью по CSR менее 35 %. При величине горячей прочности кокса более 40% предпочтительно промывочные материалы (кремнеземо-марганцовистую руду, конвертерный шлак) загружать в зону рудного гребня. Использование разработанных режимов загрузки промывочных материалов на доменных печах ПАО «ММК» позволяло улучшать дренажную способность коксовой насадки и обеспечивать повышение технико-экономических показателей их работы (таблица 8).

Марганцевую руду целесообразно загружать в доменную печь, при использовании в составе шихты кокса мелких фракций в количестве более 12 кг/т чугуна из расчета 1,7 кг руды на 1 кг кокса мелких классов. При проведении исследований на доменных печах № 9 и 10 ПАО «ММК» для улучшения смешивания кокса мелких фракций и руды загрузку промывочного мате-

риала в бункер БЗУ осуществляли после загрузки кокса мелких фракций, размещая их в середине массы железорудных материалов.

Таблица 8 - Результаты работы доменной печи № 6 ПАО «ММК» с локальной загрузкой промывочных материалов

Показатели	Зона загрузки (по сечению колошника) промывочного материала	
	Периферия	Рудный гребень
Горячая прочность кокса, %	40,8	40,4
Расход марганцевой руды, кг/т чугуна	31,8	27,0
Расчетная вязкость шлака, Па·с	0,60	0,57
Количество шлака, остающегося в горне после выпуска, т	21,0	17,8
Производительность, т/сут	3349	3401
Удельный расход кокса, кг/т чугуна	431,2	429,3

Нейросетевым моделированием оценили взаимное сопротивление потоков шихты и газа в нижней части печи. Структура нейронной сети представлена на рисунке 9. Газодинамику низа печи характеризовали коэффициентом сопротивления шихты:

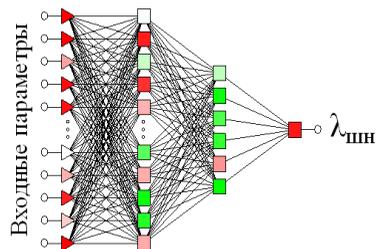


Рисунок 9 – Структура нейронной сети

$$\lambda_{шн} = \frac{(2 \cdot P_d - \Delta P_n) \cdot \Delta P_n}{V_d^m}, \quad (20)$$

где  $P_d$  – давление горячего дутья, кПа;  
 $\Delta P_n$  – нижний перепад давления газов, кПа;  
 $V_d$  – расход холодного дутья, м<sup>3</sup>/мин на 1 м<sup>3</sup> полезного объема печи.

Таким путем выявлены мероприятия, обеспечивающие снижение взаимного сопротивления потоков шихты и газа в нижней части доменной печи. Изменение химического состава шихты в направлении повышения подвижности шлака сопровождалось понижением коэффициента  $\lambda_{шн}$ . При содержании MgO в шихте 1,5-1,7 %, концентрации в сырье Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в интервале 2,09-2,29% снижение содержания глинозема приводило к уменьшению его на 1,5%:

$$\lambda = 1,96 + 0,88D + 12,71ЖРС + 15,91K - 2,48D \cdot ЖРС + 6,57D \cdot K - 5,93Ж,9 \cdot K - 1,68D^2 - 0,3ЖРС^2 - 14,22K^2, \quad (21)$$

где D, ЖРС и K – комплексные показатели, характеризующие соответственно параметры дутья, железорудного сырья и кокса.

Относительная ошибка прогноза модели в среднем составляла 0,28%.

В зависимости от условий доменной плавки было выявлено прямое и обратное влияние исследуемых параметров на коэффициент сопротивления шихты (рисунок 10).

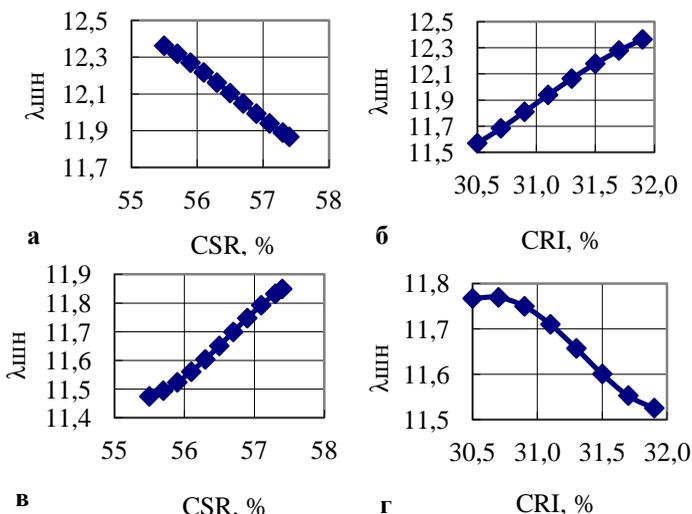


Рисунок 10 – Зависимость коэффициента сопротивления шихты от показателей качества кокса при содержании кислорода 27 % и расходе природного газа 85 (а и б) и 132 м<sup>3</sup>/т чугуна (в и г)

При расходе природного газа в интервале 85-115 м<sup>3</sup>/т чугуна повышение горячей прочности кокса по CSR на 0,5% абс. в интервале 55,5-57,4% уменьшало коэффициент сопротивления шихты на 1,04%. При расходе природного газа 115-132 м<sup>3</sup>/т чугуна повышение горячей прочности кокса на 0,5% абс. увеличивало коэффициент сопротивления шихты на 0,87%.

Установили, что основными факторами, влияющими на удельный расход природного газа выше 115 м<sup>3</sup>/т чугуна в условиях работы доменных печей ПАО «ММК», являлись расход технологического кислорода, реакционная способность кокса по CRI и горячая прочность кокса по CSR.

На доменной печи № 6 ПАО «ММК» повышение удельного расхода природного газа от 113,8 до 124,4 м<sup>3</sup>/т чугуна обеспечивали за счет роста реакционной способности кокса от 34,6 до 35,2% в условиях сохранения содержания O<sub>2</sub> в дутье 27,4%. Дальнейшему увеличению расхода природного газа от 124,4 до 143,8 м<sup>3</sup>/т чугуна соответствовало сохранение содержания кислорода в дутье при росте реакционной способности кокса от 35,2 до 39,0% в условиях уменьшения его горячей прочности от 45,3 до 37,6 %. Средняя величина коэффициента замены кокса природным газом составляла не менее 0,7 кг/м<sup>3</sup>.

В условиях работы печей № 4 и 6 на коксе, имеющем реакционную способность 37,8-45,5 %, изменение соотношения расходов природного газа и кислорода в интервале 0,40-0,45 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> снижало удельный расход кокса более чем на 3 кг/т чугуна.

Установили рациональные соотношения количеств природного газа и кислорода в дутье для разных условий работы печи по качеству кокса (таблица 9).

Таблица 9 – Рациональные соотношения расходов природного газа и кислорода в зависимости от реакционной способности кокса

CRI кокса, %	Соотношение расходов природного газа и всего кислорода в дутье
30-33	0,30-0,33
33-35	0,33-0,40
35-40	0,40-0,45
>40	0,45-0,40

### Заключение

1. Разработаны новые научно обоснованные технологические решения локального воздействия на лимитирующие зоны и процессы доменной плавки для энергоресурсосбережения, структурированные в интерактивную систему с приёмами цифровизации, основными составляющими которой являются: физическое и математическое моделирование, аналитическое изучение производственной ситуации и информационной среды, проведение опытных плавок, сопровождение тестируемых режимов, введение изменений в технологической инструкции, внедрение полученных результатов.

2. Физическим моделированием установлены закономерности поступления компонентов шихты из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи для различных условий загрузки, описанные математическими зависимостями. Они позволяют решать задачу локального воздействия на лимитирующие зоны и процессы. Наиболее высокие величины показателя равномерности поступления компонентов шихты из бункера на колошник – 0,74-0,77 обеспечивали размещением в бункере БЗУ окатышей между слоями агломерата, сформированными в количестве 25 и 75% от его расхода, располагающимися соответственно под и над окатышами; расположением коксового орешка, промывочных материалов в середине массы железорудного сырья.

3. Создана методика определения и использования относительной неравномерности распределения материалов и газов по окружности печи на основе  $\chi^2$ -статистики, используя квантили  $\chi_k^2$ - статистики для вычисления  $p = p(\chi_k^2)$ . Методика тестирована на доменных печах № 2, 4, 6 и 9 ПАО «ММК». Понижению коэффициента окружной неравномерности распределения температур на 10% соответствовало увеличение производительности доменных печей на 0,22% и понижение удельного расхода кокса на 0,41%.

4. Рассчитаны и экспериментально оценены режимы доменной плавки, обеспечивающие энерго-ресурсосбережение понижением коэффициента окружной неравномерности распределения температуры периферийных газов, вычисленного по разработанной методике. Рациональное размещение железорудных и добавочных материалов в бункере БЗУ по пункту 2, стабилизация

соотношений расходов природного газа и дутья по фурмам на доменных печах ПАО «ММК» позволила увеличить коэффициент замены кокса орешком с 0,68 до 0,91 кг/кг, снизить расход кокса увеличением потребления природного газа на 500 м<sup>3</sup>/ч, повысить степень использования СО на 2,8% отн. и Н<sub>2</sub> на 1,0% отн., понизить удельный расход кокса на 3,9 кг/т чугуна.

5. Выявлены закономерности распределения материалов и газов по радиусу колошника при различных режимах набора компонентов шихты в бункер БЗУ лоткового типа для локального воздействия на лимитирующие зоны и процессы. Повышением доли агломерата, поступающего в зону рудного гребня, с 45 до 70%, понижая его содержание на периферии путем увеличения в ней доли окатышей, уменьшили удельный расход кокса на 3,7 кг/т чугуна.

6. Обоснованы и исследованы режимы загрузки шихтовых материалов, обеспечивающие устранение искажений рабочего профиля доменной печи. Для удаления настыва в верхней части печи повышали долю окатышей в шихте с 30-35 до 50-55% и размещали их в пристеночной зоне колошника. Использование разработанного режима в течение 3-6 месяцев позволило уменьшить толщину настыва в среднем на 80 мм, что повысило производительность печей на 18,9 % и понизило удельный расход кокса на 5,8 %. Рост температуры холодильников шахты от увеличения доли окатышей на 1% в интервале их содержания 30-60% составил 1,1 °С.

7. Предотвращено излишнее истирание футеровки шахты, заплечиков и распара доменных печей № 2, 4, 6 и 9 ПАО «ММК» для обеспечения рационального уровня температур их холодильников – 40-50 °С снижением рудной нагрузки в периферийной зоне и отдалением окатышей от футеровки изменением последовательности набора компонентов шихты в бункер БЗУ. Использование разработанного режима при постоянной доле окатышей, равной 38%, снизило среднюю температуру холодильников шахты доменной печи № 9 ПАО «ММК» на 3,4 °С. *(Разработанная технология удостоена серебряной медали лауреата Международной промышленной выставки «МЕТАЛЛ-ЭКСПО» в 2017 году).*

8. Разработаны рациональные режимы загрузки материалов, формирующих гарнисаж в горне печи, обеспечивающие эффективное уменьшение тепловых нагрузок на холодильники в нижней части доменных печей, оснащенных БЗУ лоткового типа. Загрузка титаномагнетитовой руды в нижнюю часть бункера БЗУ и выпуск его содержимого в пристеночную зону печи № 2 ПАО «ММК» в течение 44 суток в количестве, обеспечивающем прирост содержания TiO<sub>2</sub> в шлаке на 0,32%, а Ti в чугуне на 0,020% при конечном их содержании в продуктах плавки соответственно 1,16 и 0,099%, сопровождалось снижением величины плотности теплового потока по внутренним виткам холодильников на 14,8%.

9. Предложены и реализованы способы энергоресурсосбережения воздействием на параметры загрузки при работе доменных печей с верхней лимитирующей зоной по газодинамике. Уменьшение коэффициента сопротив-

ления шихты движению газового потока в верхней части печи  $\lambda_v$  обеспечивали за счет рационального распределения по радиусу печи рудной нагрузки, железорудных и добавочных материалов в зависимости от их прочностных характеристик и температуры. В исследуемых периодах уменьшение  $\lambda_v$  на 5 % обеспечивало снижение рудной нагрузки в периферийной зоне на 5,91% в интервале 100-67%, повышение доли агломерата на 9,2% в интервале от 45 до 70% в зоне рудного гребня за счет уменьшения его доли на соответствующую величину в периферийной части печи, загрузка 8,2 кг/т чугуна коксового орешка в среду железорудного сырья с использованием приёмов равномерного его распределения по окружности. Реализация разработанных способов позволяла снижать удельный расход кокса до 9,4 кг/т чугуна.

10. Установлено, что при работе доменных печей ПАО «ММК» с нижней определяющей по газодинамике зоной рациональными режимами являются: загрузка промывочных материалов (марганцевая и (или) кремниземомарганцовистая руды, конвертерный шлак) к осевой зоне при поступлении кокса с горячей прочностью по CSR менее 35 %, загрузка промывочных материалов в зону рудного гребня при величине CSR более 40%; равномерное распределение промывочных материалов по сечению и окружности при CSR в интервале 35 – 40 %, загрузка марганцевой руды при использовании в составе шихты кокса мелких фракций в количестве более 12 кг/т чугуна, исходя из соотношения 1,7 кг руды на 1 кг кокса мелких классов. Реализация преимуществ локальной загрузки марганцевой руды и конвертерного шлака в количестве 30-50 кг/т чугуна в зону горна доменных печей № 2, 6 ПАО «ММК» с наихудшей дренажной способностью коксовой насадки увеличивала их производительность на 1,5-3%.

11. Внедрена разработанная интерактивная система локального воздействия на лимитирующие зоны и процессы доменной плавки для энергоресурсосбережения путём повышения эффективности действия технологических параметров на печах № 2, 4, 6, 9, 10 ПАО «ММК», оснащенных бесконусными загрузочными устройствами лоткового типа.

12. Долевой экономический эффект от внедрения результатов хозяйственных НИР в производство ПАО «ММК» составил более 10 млн руб.

Полное использование разработок, протестированных успешными опытными плавками, обеспечивает экономический эффект около 200 руб./т чугуна.

13. Результаты диссертации внедрены в учебный процесс подготовки бакалавров и магистров по направлениям 22.03.02, 22.04.02 – Metallургия, кадров высшей квалификации по направлению 22.06.01 – Технологии материалов в ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

### **Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы**

Положительные результаты лабораторных исследований и промышленных испытаний, внедрение научных результатов диссертационного исследования в ПАО «ММК» позволяет рекомендовать к продолжению исследований на других предприятиях РФ с учетом особенностей их работы.

## **Основное содержание работы отражено в следующих публикациях:**

### **В рекомендованных ВАК РФ изданиях:**

1. Влияние коксового орешка на фильтрацию жидких продуктов плавки в горне доменной печи / С.К. Сибатуллин, А.С. Харченко, А.В. Чевычелов и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. - 2010. - № 4. - С. 26-28.
2. Результаты совместного использования в доменной печи коксового орешка с одновременным улучшением качества скипового кокса / С.К. Сибатуллин, А.С. Харченко, А.А. Полинов и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. - 2010. - № 2. - С. 24 - 27.
3. Харченко, А.С. Поступление коксового орешка совместно с агломератом и окатышами из шихтового бункера БЗУ в колошниковое пространство доменной печи / А.С. Харченко, С.К. Сибатуллин, Н.П. Сысоев // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. - 2011. - № 8. - С. 18-19.
4. Харченко, А.С. Использование нейросетевого моделирования для изучения газодинамического режима в нижней части доменной печи в условиях ее работы с коксовым орешком / А.С. Харченко, С.К. Сибатуллин, А.В. Колосов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. - 2011. - № 11. - С. 23-26.
5. Прочностные характеристики коксового орешка различного происхождения / С.К. Сибатуллин, А.С. Харченко, Е.О. Теплых и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. - 2012. - № 1. - С. 19-21.
6. Влияние последовательности загрузки компонентов шихты в бункер компактного БЗУ на эффективность работы доменной печи / А.В. Чевычелов, М.Н. Евстафьев, В.А. Бегинюк., С.К. Сибатуллин, Е.О. Теплых, А.С. Харченко // Черные металлы. - 2012. - № 5. - С. 43-45.
7. Выбор типа бесконусного загрузочного устройства для доменных печей / В.Г. Дружков, А.В. Иванов, И.Е. Прохоров, Н.А. Майстренко, А.С. Харченко // Черные металлы. - 2013. - № 11. - С. 9-13.
8. Использование коксового орешка на доменных печах, оснащенных компактным БЗУ лоткового типа, в зависимости от условий хода процесса / С.К. Сибатуллин, А.С. Харченко, Е.О. Теплых, А.В. Чевычелов, В.А. Бегинюк // Металлургические процессы и оборудование. - 2013. - № 4. - С. 55-61.
9. Сибатуллин, С.К. Рациональное использование коксового орешка на доменных печах с компактным БЗУ лоткового типа / С.К. Сибатуллин, А.С. Харченко, В.А. Бегинюк // Сталь. - 2014. - № 4. - С. 10-13.
10. Сибатуллин, С.К. Рациональное размещение материалов в шихтовом бункере компактного бесконусного загрузочного устройства / С.К. Сибатуллин, А.С. Харченко, Е.О. Теплых, В.А. Бегинюк, М.А. Семенов, Д.Н. Гушин // Металлургические процессы и оборудование. - 2014. - № 1. - С. 27-32.
11. Сибатуллин, С.К. Выявление рациональной последовательности набора компонентов сырья в бункер БЗУ лоткового типа физическим модели-

рованием / С.К. Сибатуллин, А.С. Харченко // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. - 2015. - № 3. - С. 28-34.

12. Сибатуллин, С.К. Выявление рационального режима загрузки коксового орешка в доменную печь компактным загрузочным устройством лоткового типа / С.К. Сибатуллин, А.С. Харченко, Г.Н. Логачев // Черная металлургия. - 2016. - № 9 (1401). - С. 56-64.

13. Улучшение работы доменной печи кратковременным уменьшением расхода природного газа / С.К. Сибатуллин, А.С. Харченко, Е.О. Харченко, М.И. Сибатуллина, С.Р. Миникаев, В.А. Бегинюк // Черная металлургия. - 2017. - № 2. - С. 16-20.

14. Совершенствование хода доменного процесса повышением расхода природного газа по газодинамике в верхней ступени теплообмена / С.К. Сибатуллин, А.С. Харченко, В.А. Бегинюк, В.Н. Селиванов, В.П. Чернов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. - 2017. - № 1. - С. 37-44.

15. Соотношение удельных расходов кокса и природного газа в зависимости от условий работы доменной печи, оснащенной БЗУ лоткового типа / С.К. Сибатуллин, А.С. Харченко, В.А. Шаган, В.А. Бегинюк, М.А. Семенов // Черная металлургия. - 2017. - № 8. - С. 32-42.

16. Выявление источников неравномерного распределения компонентов железорудной шихты, загружаемой в доменную печь / С.К. Сибатуллин, А.С. Савинов, А.С. Харченко, Л.Д. Девятченко // Черная металлургия. - 2017. - № 12. - С. 30-36.

17. Целесообразность комплексирования минералого-аналитических методов изучения металлургических шлаков / Е.А. Горбатова, Е.Г. Ожогина, А.Н. Лебедев, Е.А. Емельяненко, А.С. Харченко, В.Н. Селиванов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. - 2017. - № 4. - С. 31-39.

18. Сибатуллин, С.К. Приложение Марковских цепей к анализу эффективности работы доменной печи / Сибатуллин С.К., Харченко А.С., Девятченко Л.Д. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. - 2018. - № 8. - С. 649-656.

19. Харченко, А.С. Закономерности поступления компонентов шихты по крупности из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи в зависимости от условий загрузки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. - 2018. - Т.16. - №3. - С. 46-56.

20. Сибатуллин, С.К. Оценка неравномерности распределения шихтовых материалов в доменной печи / Сибатуллин С.К., Харченко А.С., Девятченко Л.Д. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. - 2018. - № 10. - С. 766-773.

21. Харченко А.С. Выявление закономерностей совместного поступления агломерата и окатышей из бункера БЗУ лоткового типа в колошниковое пространство печи физическим моделированием // Черная металлургия. - 2019. - № 1. - С. 37-47.

22. Панишев, Н.В. Изучение возможности вовлечения в металлургическое производство марганецсодержащего сырья Южного Урала / Панишев Н.В., Харченко А.С., Бигеев В.А., Потапова М.В., Закуцкая Л.А. // Известия Волгоградского государственного технического университета. - 2019. - Т.230. - №7. - С. 31-37.

**В изданиях, входящих в наукометрические базы Web of Science и Scopus:**

1. Quality comparison of coke nuts / S.K. Sibagatullin, A.S. Kharchenko, E.O. Teplykh, E.N. Stepanov, D.A. Mezin, V.B. Fetisov // Coke and chemistry. - 2012. - № 2. - P. 62-65.

2. Charging coke nuts in the batch bunker / A.V. Chevychelov, A.V. Pavlov, E.O. Teplykh, A.S. Kharchenko, S.K. Sibagatullin // Steel in translation. - 2013. - № 7. - P. 434-435.

3. Sibagatullin, S.K. Processing solutions for optimum implementation of blast furnace operation / S.K. Sibagatullin, A.S. Kharchenko, V.A. Beginyuk // Metallurgist. - 2014. - № 3-4. - P. 285-293.

4. Influence of coke nut introduction in blast furnace charge on melting parameters / M.V. Chukin, S.K. Sibagatullin, A.S. Kharchenko, V.P. Chernov, G.N. Logachev // CIS iron and steel review. - 2016. - № 2. - P. 9-13.

5. Sibagatullin, S.K. Neural network modeling of coefficient of burden resistance to the gas movement in the lower part of the blast furnace in conditions of operation with coke nut / S.K. Sibagatullin, A.S. Kharchenko, M.V. Potapova // Materials science forum. - 2016. - Т. 870. - P. 487-491.

6. Sibagatullin, S.K. The rational mode of nut coke charging into the blast furnace by compact trough-type charging device / S.K. Sibagatullin, A.S. Kharchenko, G.N. Logachev // The international journal of advanced manufacturing technology. - 2016. - № 1-4. - P. 531-537.

7. Improvement of iron ore burden components distribution when charging into blast furnace top by physical and mathematical modeling of fixed effects / S.K. Sibagatullin, A.S. Kharchenko, L.D. Devyatchenko, V.L. Steblyanko // Journal of chemical technology and metallurgy. - 2017. - № 4. - P. 694-701.

8. Improvement of blast furnace practice due to creation of the conditions for elevation of natural gas consumption via usage of raw materials with increased strength / Sibagatullin, S.K., Kharchenko, Chernov V.P., Beginyuk V.A. // Chernye metally. - 2017. - № 8. - С. 27-33.

9. A development of the adaptive technology of sinter production at PJSC MMK / Sibagatullin, S.K., Kharchenko, A.S., Savinov, A.S., Gushchin, D.N., Mazur, I.P. // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. - 2018 - Т. 53. № 5 - P. 990-994.

10. Blast furnace performance improved through optimum radial distribution of materials at the top while changing the charging pattern / S.K. Sibagatullin, A.S. Kharchenko, G.Yu. Savchenko, V.A. Beginyuk // CIS Iron and Steel Review. - 2018 - Т. 16. - № 2 - P. 11-15.

### **Монография:**

Сибатуллин, С.К. Использование коксового орешка на доменных печах: монография / С.К. Сибатуллин, А.С. Харченко. - Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. – 162 с.

### **Охранные документы:**

1. Пат. 2700977 Российская Федерация, МПК С21В5/00. Способ загрузки доменной печи / А.С. Харченко, С.К. Сибатуллин, А.А. Полинов, М.А. и др.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» - № 2018147577; опубл. 24.09.2019 Бюл. № 27.

2. Определение рационального режима загрузки коксового орешка в колошниковое пространство доменной печи, оснащенной БЗУ лоткового типа: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011616895 от 6.09.2011 / В.М. Колокольцев, С.К. Сибатуллин, А.С. Харченко и др.

3. Определение рационального режима загрузки шихтовых материалов в колошниковое пространство доменной печи, оснащенной БЗУ лоткового типа: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015617266 от 06.07.2015. / В.М. Колокольцев, С.К. Сибатуллин, А.С. Харченко и др.

4. Определение коэффициента однородности по видам и крупности компонентов шихты, поступающих из бункера БЗУ в колошниковое пространство доменной печи: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015617267 от 06.07.2015. / В.М. Колокольцев, С.К. Сибатуллин, А.С. Харченко.

5. Расчет коэффициента равномерности поступления агломерата и окатышей из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи при различных условиях загрузки: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018660756 от 28.08.2018. / А.С. Харченко, С.К. Сибатуллин и др.

6. Выявление рационального режима набора агломерата и окатышей в бункер БЗУ лоткового типа, обеспечивающего однородное по крупности поступление их в колошниковое пространство доменной печи: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018661555 от 07.09.2018. / А.С. Харченко, С.К. Сибатуллин и др.

### **В других изданиях:**

1. Истечение материалов из шихтового бункера лоткового загрузочного устройства доменной печи по видам крупности / С.К. Сибатуллин, А.С. Харченко, С.И. Гаврюшкин и др. // Теория и технология металлургического производства. - 2009. - №9. - С. 21-25.

2. Об условиях, необходимых для эффективного использования коксового орешка в шихте доменной печи / А.С. Харченко, Е.О. Теплых, А.А. Полинов и др. // Теория и технология металлургического производства. - 2010. - №1. - С. 26-30.

3. Влияние различных факторов на равномерность распределения коксового орешка в колошниковом пространстве доменной печи, оснащенной БЗУ

лоткового типа / А.С Харченко, С.К. Сибатуллин, Е.О. Теплых и др. // Теория и технология металлургического производства. - 2010. - №1. - С. 33-38.

4. Использование коксового орешка в шихте доменной печи с компенсацией его негативного воздействия на дренаж продуктов плавки / В.А. Гостенин, С.К. Сибатуллин, А.С. Харченко и др. // Труды Третьего международного конгресса по аглококсодоменному производству, Украина, Ялта, 2010. - С. 143-152.

5. Сибатуллин, С.К. Влияние последовательности загрузки компонентов шихты в бункер БЗУ на равномерность их поступления в колошниковое пространство доменной печи / С.К. Сибатуллин, Е.О. Теплых, А.С. Харченко // Теория и технология металлургического производства. - 2011. - № 11. - С. 12-16.

6. Повышение эффективности работы доменных печей, использующих в шихте коксовый орешек / С.К. Сибатуллин, А.С. Харченко, Е.О. Теплых, и др. // Четвертый международный промышленный форум «Реконструкция промышленных предприятий – прорывные технологии в металлургии и машиностроении». - Челябинск, 2011. - С. 149 - 151.

7. Влияние расположения добавок в слое агломерата в бункере компактного БЗУ на равномерность поступления шихтовых материалов в колошниковое пространство печи / А.С. Харченко, С.К. Сибатуллин, Е.О. Теплых и др. // Теория и практика тепловых процессов в металлургии: сб. докл. Международной научно-практической конференции. - Екатеринбург: ГОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», 2012. - С. 150-154.

8. Степень перехода титана в передельный чугун в условиях ОАО «ММК» / С.К. Сибатуллин, Н.А. Бидненко, А.С. Харченко и др. // Современная металлургия начала нового тысячелетия: сб. 9-й научно-практической конференции. - Липецк: ФГБОУ ВПО «ЛГТУ», 2012. - С. 20-25.

9. Зависимость коэффициента равномерности выхода шихтовых материалов в колошниковое пространство от последовательности их расположения в бункере БЗУ / А.С. Харченко, С.К. Сибатуллин, Е.О. Теплых и др. // Современная металлургия начала нового тысячелетия: сб. 9-й научно-практической конференции. Липецк: ФГБОУ ВПО «ЛГТУ», 2012. - С. 39-44.

10. Зависимость равномерности поступления агломерата и окатышей в колошниковое пространство печи от последовательности размещения их в бункере БЗУ / С.К. Сибатуллин, Е.О. Теплых, А.С. Харченко и др. // Теория и технология металлургического производства. - 2012. - № 12. - С. 16-21.

11. Распределение титана по продуктам при выплавке передельного чугуна, содержащего 0,5-0,8% кремния / С.К. Сибатуллин, Н.А. Бидненко, А.С. Харченко и др. // Теория и технология металлургического производства. - 2012. - № 12. - С. 36-42.

12. Влияние последовательности расположения агломерата по крупности в бункере БЗУ на однородность его поступления в колошниковое пространство печи / С.К. Сибатуллин, Е.О. Теплых, А.С. Харченко и др. // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: сб. докл. 70-й межрегион. научно-технической конференции. - Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2012. - Т.1. - С. 125-127.

13. Повышение полноты использования кокса на доменных печах / С.К. Сибатуллин, В.Л. Терентьев, А.С. Харченко и др. // Наука и производство Урала. - 2012. - № 8. - С. 13-17.

14. Влияние расположения окатышей в слое агломерата в бункере компактного БЗУ на равномерность их поступления в колошниковое пространство печи / Е.О. Теплых, С.К. Сибатуллин, А.С. Харченко и др. // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве: сб. докл. 2-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных (ТИМ'2013) с международным участием. - Екатеринбург: ГОУ ВПО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», 2013. - С. 106-109.

15. Использование коксового орешка на доменных печах в зависимости от расположения определяющей зоны по силовому взаимодействию потоков шихты и газа / С.К. Сибатуллин, А.С. Харченко, М.А. Семенюк и др. // Теория и технология металлургического производства. - 2013. - № 1 (13). - С. 16-18.

16. Улучшение работы доменной печи воздействием на соотношения расходов природного газа и дутья по фурмам / С.К. Сибатуллин, А.С. Харченко, С.Р. Миникаев и др. // Творческое наследие В. Е. Грум-Гржимайло: история, современное состояние, будущее: сб. докл. Международной научно-практической конференции. - Екатеринбург: ФГОУ ВПО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», 2014. - С. 110-114.

17. Определяющие процессы и зоны доменной печи / С.К. Сибатуллин, А.С. Харченко, В.В. Бултаков др. // Творческое наследие В. Е. Грум-Гржимайло: история, современное состояние, будущее: сб. докл. Международной научно-практической конференции. - Екатеринбург: ФГОУ ВПО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», 2014. - С. 411-418.

18. Улучшение работы доменной печи воздействием на соотношения расходов природного газа и дутья по фурмам / С.К. Сибатуллин, А.С. Харченко, С.Р. Миникаев и др. // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве: сб. докл. III Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных (ТИМ'2014) с международным участием. - Екатеринбург: ФГОУ ВПО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», 2014. - С. 88-92.

19. Стабилизация соотношения расходов природного газа и дутья по фурмам доменной печи / С.К. Сибатуллин, А.С. Харченко, А.А. Полинов А.А. и др. // Теория и технология металлургического производства. - 2014. - № 1 (14). - С. 23-25.

20. Влияние стабилизации соотношения расходов природного газа и дутья по фурмам на показатели работы доменной печи / С.К. Сибатуллин, А.С. Харченко, В.А. Бегинюк и др. // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: сб. докл. 72-й междунар. научно-технической конференции. - Магнитогорск: ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2014. - Т.1. - С. 169-172.

21. Изучение закономерностей выпуска шихтовых материалов из бункера БЗУ лоткового типа / С.К. Сибатуллин, А.С. Харченко, С.Р. Миникаев и др.

// Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: сб. докл. 72-й междунар. научно-технической конференции. Магнитогорск: ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2014. - Т.1. - С. 173-176.

22. Влияние расхода окатышей на равномерность поступления компонентов шихты из бункера БЗУ лоткового типа / С.К. Сibaгатуллин, А.С. Харченко, М.В. Сидоров и др. // Наука и производство Урала. - 2014. - № 10. - С. 5-7.

23. Харченко, А.С. Применение кокса мелких фракций в доменном производстве / А.С. Харченко, С.К. Сibaгатуллин, Г.Н. Логачев // Литейные процессы. - 2014. - № 13. - С. 30-35.

24. Влияние матрицы загрузки на тепловые нагрузки системы охлаждения доменных печей, оснащенных компактным БЗУ лоткового типа / С.К. Сibaгатуллин, А.С. Харченко, Е.О. Харченко и др. // Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство: сб. 12-й Всероссийской научно-практической конференции. - Старый Оскол, 2015. - Т.1 - С. 108-113.

25. Сibaгатуллин, С.К. Изучение прочностных характеристик коксового орешка различного вида / С.К. Сibaгатуллин, А.С. Харченко // Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР // Тр. научно-практической конференции с международным участием и элементами школ молодых ученых. - Екатеринбург: Уральский рабочий, 2015. - С. 139-143.

26. Сibaгатуллин, С.К. Физическое моделирование применяемых в ОАО «ММК» режимов загрузки шихты в бункер БЗУ / С.К. Сibaгатуллин, А.С. Харченко // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве (ТИМ-2015): сб. докл. 4-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием. - Екатеринбург: ФГОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», 2015. - С. 143-146.

27. Влияние режимов загрузки компактным БЗУ лоткового типа на тепловые нагрузки системы охлаждения доменных печей / С.К. Сibaгатуллин, А.С. Харченко, Е.О. Харченко и др. // Металлургия: технологии, инновации, качество: сб. труд. 19-й Международной научно-практической конференции. Новокузнецк. СибГИУ, 2015. - С. 27-31.

28. Сibaгатуллин, С.К. Влияние ввода коксового орешка в шихту доменных печей на показатели хода восстановления железа из оксидов / С.К. Сibaгатуллин, А.С. Харченко, А.В. Чевычелов // Инновации в материаловедении и металлургии: сб. труд. 4-й Международной интерактивной научно-практической конференции. - Екатеринбург: ФГОУ ВПО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», 2015. - С. 51-55.

29. Влияние загруженности пристеночной зоны доменных печей железорудным сырьем на тепловые нагрузки системы охлаждения / А.С. Харченко, Е.О. Харченко, М.В. Сидоров и др. // Теория и технология металлургического производства. - 2015. - № 2 (17). - С. 15-18.

30. Сibaгатуллин, С.К. Повышение равномерности соотношения расходов природного газа и дутья по фурмам доменной печи / С.К. Сibaгатуллин, А.С. Харченко, В.А. Бегинюк // Наука и производство Урала. - 2015. - № 11. - С. 33-35.

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

32. Действие различных факторов на равномерность поступления шихтовых материалов по крупности из бункера БЗУ лоткового типа / С.К. Сибатуллин, А.С. Харченко, В.А. Бегинюк и др. // Теория и технология металлургического производства. - 2016. - № 2 (19). - С. 8-12.

33. Сибатуллин, С.К. Действие режимов загрузки компонентов шихты в доменную печь на тепловые нагрузки системы охлаждения / С.К. Сибатуллин, А.С. Харченко // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: сб. докл. 74-й междунар. научно-технической конференции. - Магнитогорск: ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2016. - Т.1. - С. 130-133.

34. Действие расхода природного газа на коэффициент сопротивления шихты в зависимости от условий хода доменной плавки / С.К. Сибатуллин, А.С. Харченко, Е.О. Харченко и др. // Технологии металлургии, машиностроения и материалобработки. - 2016. - № 15. - С. 36-42.

35. Сибатуллин, С.К. Уменьшение потребности в коксе на выплавку чугуна в доменной печи изменением расхода природного газа / С.К. Сибатуллин, А.С. Харченко, Г.Ю. Савченко и др. // Современные достижения университетских научных школ: сб. докл. научн. школы-конференции. - Магнитогорск: ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова». - 2016. - № 1. - С. 12-15.

36. Выявление рациональных режимов загрузки железорудных материалов в колошниковое пространство печи при повышенной доле окатышей в шихте / С.К. Сибатуллин, А.С. Харченко, М.М. Кашапов и др. // Теория и технология металлургического производства. - 2017. - № 3 (22). - С. 4-9.

37. Mineralogy of blast furnace slags / Е.А. Gorbatoва, А.С. Kharchenko, Е.Г. Ozhogina, О.А. Yakushina // Вестник института геологии Коми научного центра Уральского отделения РАН. - 2017. - № 4. - С. 24-28.

38. Разработка и испытание локального режима промывки доменной печи новым кремнеземо-марганцовистым материалов / С.К. Сибатуллин, А.С. Харченко, Г.Ю. Савченко и др. // Современные достижения университетских научных школ: сб. докл. научн. школы-конференции. Магнитогорск: ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» - 2017. - № 2. - С. 9-12.

39. Промывка горна доменной печи кремнеземо-марганцовистой рудой Ниязгуловского месторождения / В.А. Бигеев, С.К. Сибатуллин, А.С. Харченко, Н.В. Панишев и др. // Теория и технология металлургического производства. - 2018. - № 3 (26). - С. 12-16.