

На правах рукописи



ДЖИМО Сумайла Омейза

**АНАЛИЗ ВОЗМОЖНЫХ СПОСОБОВ СНИЖЕНИЯ ПОТЕРЬ
ТЕПЛА ПРИ ВЫПЛАВКЕ ЧУГУНА В ДОМЕННЫХ ПЕЧАХ**

05.16.02 – Metallургия черных, цветных и редких металлов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Екатеринбург – 2017

Работа выполнена на кафедре «Металлургия железа и сплавов» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Загайнов Сергей Александрович

Официальные оппоненты: **Фролов Юрий Андреевич**,
доктор технических наук, ООО Научно-производственное предприятие «Уралэлектра», г. Екатеринбург, консультант-металлург отдела систем регулирования и метрологии;

Чесноков Юрий Анатольевич,
кандидат технических наук, ФГБУН Институт металлургии Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, заведующий лабораторией пирометаллургии черных металлов

Ведущая организация: ОАО «Уральский институт металлов», г. Екатеринбург

Защита диссертации состоится «17» марта 2017 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 212.285.05 на базе ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <http://lib.urfu.ru/mod/data/view.php?d=51&rid=264372>

Автореферат диссертации разослан «___» января 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Сулицин Андрей Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы определяется необходимостью изучения всего спектра факторов, определяющих потери тепла в нижней зоне доменной печи, выявления доминирующих связей развития физико-химических процессов и необходимостью разработки рекомендаций по снижению потерь тепла. Потери тепла влияют на удельный расход кокса, а, следовательно, и на производительность доменной печи. При производстве черных металлов наибольшее количество углерода топлива расходуется на производство чугуна, поэтому снижение потерь тепла приводит к экономии топлива и уменьшению воздействия на окружающую среду. Поиск способов снижения потерь тепла является актуальной задачей.

Основная **цель диссертационного исследования** состоит в определении путей снижения потерь тепла при выплавке чугуна в доменных печах.

Достижение поставленной цели потребовало:

- анализа современного состояния теории и практики производства чугуна, а также конкретизации технологических задач, решение которых обеспечивает совершенствование технологии доменной плавки;
- анализа производственных данных о работе доменных печей, работающих на смеси агломерата и окатышей;
- совершенствования методов оценки развития основных процессов доменной плавки на основе математических моделей, что потребовало разработки новых методов моделирования влияния рудной нагрузки и гранулометрического состава шихтовых материалов на процессы теплообмена в периферийной области верхней зоны печи;
- прогнозирования влияния распределения рудной нагрузки и качества ЖРМ на развитие основных процессов, протекающих в периферийной области верхней зоны доменной печи;
- разработки рекомендаций по снижению потерь тепла в нижней зоне печи.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Установлено, что как потери тепла, так и затраты на выплавку чугуна в доменной печи, во многом определяются колебаниями затрат тепла на развитие реакций прямого восстановления.

2. Расчётным путём установлено и практическими данными подтверждено, что температурное поле периферийной зоны определяет тепловые нагрузки на холодильники распара и заплечиков. При этом, как правило, снижение температуры периферийных газов свидетельствует о повышении тепловых нагрузок на холодильники заплечиков и распара, за счет снижения

толщины гарниссажа, которая определяется температурой плавления первичного шлака. Это обстоятельство позволяет использовать данную информацию для управления распределением материала по сечению доменной печи.

3. Разработана математическая модель, позволяющая оценить влияние гранулометрического состава агломерата на время восстановления куска по реакциям косвенного восстановления.

4. Показано, что исключение фракции «+40» и «+25» мм из агломерата позволяет улучшить косвенное восстановление и тем самым снизить затраты тепла на выплавку чугуна в доменных печах.

5. Разработана методика оперативной оценки и прогноза изменения тепловых нагрузок на холодильники при анализе совместного изменения температуры и состава газа на периферии.

Методы исследований базируются на физическом и математическом моделировании процессов, протекающих в печи. Для решения задач исследования использовалась информация, полученная на действующих доменных печах в процессе нормальной их работы и в периоды, характеризующиеся целенаправленным или вынужденным изменением режимных параметров.

Достоверность защищаемых положений доказывается сопоставлением результатов, полученных с использованием разработанных методов, с производственными данными, а также соответствием этих результатов общепризнанным закономерностям доменного процесса.

Практическая ценность и реализация результатов работы:

1. Разработанные математические модели могут использоваться как при выборе программы управления тепловой и восстановительной работой, а также рудной нагрузки в периферийной зоне печи, так и при выборе реконструктивных мероприятий.

2. Научно обоснован и определен оптимальный гранулометрический состав агломерата. Разработаны и реализованы на ПАО «НЛМК» рекомендации по исключению фракций крупнее 40 мм путем повышения дробления агломерационного пирога при его сходе с агломашины.

Достоверность полученных результатов основывается на использовании современных методик исследования и подтверждена опытно-промышленными испытаниями на работающих доменных печах.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы изложены и обсуждены в материалах:

➤ III международной интерактивной научно-практической конференции «Оценка влияния восстановительной работы газового потока на колошниковый

газ», «Разработка методов оценки влияния гранулометрического состава на показатели доменной плавки» (г. Екатеринбург, 2013 г.),

➤ Международной научно-практической конференции «Творческое наследие В.Е. Грум-Гржимайло», III Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве» (ТИМ'2014) «Разработка методов моделирования теплообмена в периферийной зоне доменной печи» (г. Екатеринбург, 2014 г.),

➤ IV Международной интерактивной научно-практической конференции «Влияние рудной нагрузки на степень косвенного восстановления процессов в доменной печи», «Влияние качества агломерата на показатели работы доменной печи» (г. Екатеринбург, 2014 г.),

➤ Международной конференции и выставке AISTech «Energy efficient technology to produce hot metal from titania-magnetite ore» (г. Питтсбург, США, 2016 г.).

Публикации. Основное содержание работы отражено в 12 научных публикациях, из них 4 статьи опубликованы в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 3-х глав, заключения, списка использованной литературы из 82 наименований литературы; изложена на 98 страницах машинописного текста, включая 80 рисунков и 14 таблиц.

На защиту выносятся:

- результаты статистического анализа работы доменных печей, которые подтвердили теоретические положения;
- результаты математического моделирования влияния рудной нагрузки и гранулометрического состава железорудных материалов на температурное поле в периферийной области верхней зоны доменной печи, которые показали необходимость целенаправленного формирования столба шихтовых материалов;
- рекомендации по оптимизации гранулометрического состава агломерата.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы диссертации и дана общая характеристика работы.

В **первой главе** представлен достаточно подробный аналитический обзор по теме диссертации, в результате которого обоснована цель и определены задачи диссертационного исследования.

Подтверждено, что устойчивость гарниссажа определяется содержанием FeO в первичных шлаках, которое, в свою очередь, зависит от развития реакций косвенного восстановления. Таким образом, задача формирования устойчивого гарниссажа может рассматриваться как задача снижения содержания FeO путем улучшения косвенного восстановления. Для оценки влияния основных факторов на развитие процессов косвенного восстановления необходимо учитывать особенности теплообмена и газодинамики в периферийной зоне доменной печи.

Теплообмен в доменной печи целесообразно рассматривать для двух относительно самостоятельных зон. Граница раздела этих зон проходит по изотермической поверхности, температура которой соответствует температуре заметного развития реакции $\text{CO}_2 + \text{C} = 2\text{CO}$. Тепловое состояние верхней зоны печи связано с развитием реакций косвенного восстановления. Тепловое состояние нижней зоны печи определяет затраты на физический нагрев продуктов плавки, восстановление трудно восстанавливаемых оксидов в зоне вязко - пластичного состояния.

При постановке задачи в качестве допущения принято, что суммарные потери тепла можно оценить по результатам расчета теплового баланса нижней зоны печи. Кроме того, потери тепла можно оценить через тепловые нагрузки на холодильники заплечиков.

К приоритетным задачам, решаемым методами моделирования процессов теплообмена в периферийной зоне доменной печи, относятся: изучение влияния гранулометрического состава и рудной нагрузки на высоту верхней зоны печи; изучение влияния гранулометрического состава и рудной нагрузки на температуру газов. Анализ указанных влияний на высоту верхней зоны печи должен выполняться на основе использования закономерностей газодинамики.

Установлено, что для изучения факторов, определяющих восстановление железорудных материалов в периферийной области верхней зоны печи, следует рассматривать влияние гранулометрического состава как на скорость восстановления железорудных материалов, так и на количество газов, проходящих через сечение.

Во **второй главе** на основе известных закономерностей теплообмена в доменной печи решалась задача выявления доминирующих факторов, определяющих потери тепла в доменной печи. При этом с использованием производственных данных о работе доменных печей ПАО «НЛМК» выполнена оценка взаимосвязи основных контролируемых переменных и комплексных показателей с потерями тепла в доменной печи.

Анализ потерь тепла теплового состояния основан на использовании обобщенных параметров, характеризующих тепловое состояние нижней части доменной печи, и построен на тепловом балансе этой зоны.

Уравнение теплового баланса нижней зоны доменной печи, записано в следующей форме:

$$\frac{q_r}{P} + Q_{ш} - 31750 \cdot [Fe] \cdot r_d - Q_{пот} = \sum q_i \cdot [X]_i + (c_q \cdot t_q + Ш \cdot c_{шл} \cdot t_{шл}), \quad (1)$$

где q_r – полезная тепловая мощность газового потока, учитывающая: физическое тепло дутья, тепло горения углерода до СО, тепло затраченное на конверсию природного газа и диссоциацию водяных паров, потери тепла с газовым потоком, покидающим нижнюю зону печи, кДж/мин; $Q_{ш}$ – количество тепла, поступающего в нижнюю зону печи с шихтой при температуре $t_{ш0}$; P – производительность печи (интенсивность плавки), т/мин; r_d – степень прямого восстановления железа, доли ед.; 31750 – учитывает тепловой эффект реакции прямого восстановления железа, кДж/т.чуг; $[Fe]$ – содержание железа в чугуне, %.

Правая часть уравнения (1) определяет оптимальные затраты тепла на выплавку 1 тонны чугуна данного состава при существующих конкретных условиях работы печи.

Левая часть уравнения (1) представляет собой сумму основных статей теплового баланса доменной печи, отражает влияние всех контролируемых технологических факторов на ход плавки и может быть рассчитана с привлечением технологической информации о процессе. Значение левой части уравнения теплового баланса нижней зоны доменной печи принято считать обобщенным показателем теплового состояния низа доменной печи (Q_n).

Потери тепла взаимосвязаны с затратами тепла и определяют удельный расход кокса. Анализ теплового баланса доменных печей ПАО «НЛМК» показал, что расход тепла на выплавку чугуна, потери тепла и затраты тепла на прямое восстановление находятся в определенной взаимосвязи. Наиболее существенно эта взаимосвязь проявляется при анализе колебаний расчетных величин и удельного расхода кокса. Этот факт подтверждается данными, приведенными на рисунках 1-2.

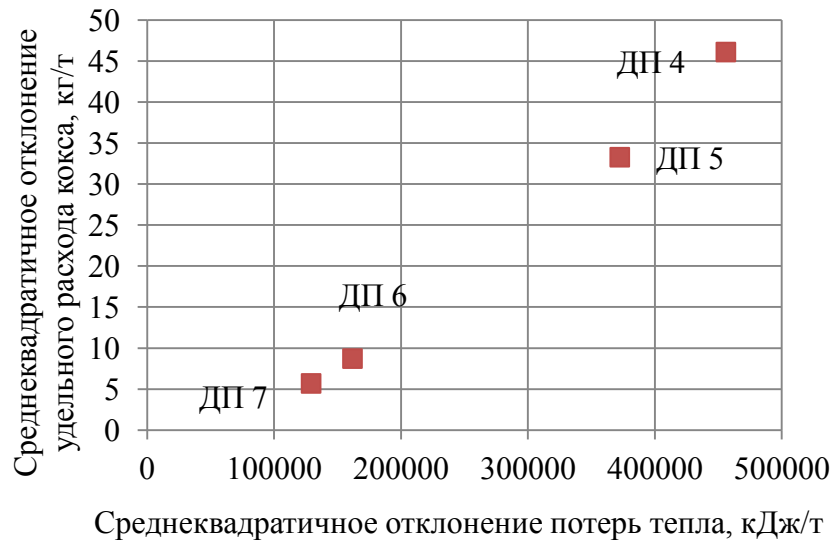


Рисунок 1 – Взаимосвязь среднеквадратичного отклонения удельного расхода кокса со среднеквадратичным отклонением потерь тепла

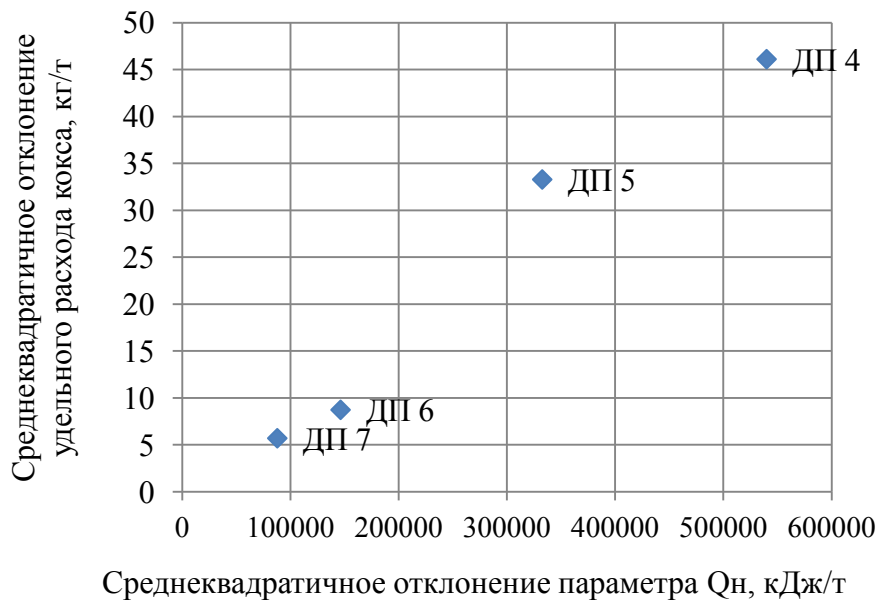


Рисунок 2 – Зависимость отклонения удельного расхода кокса от отклонения параметра Qн

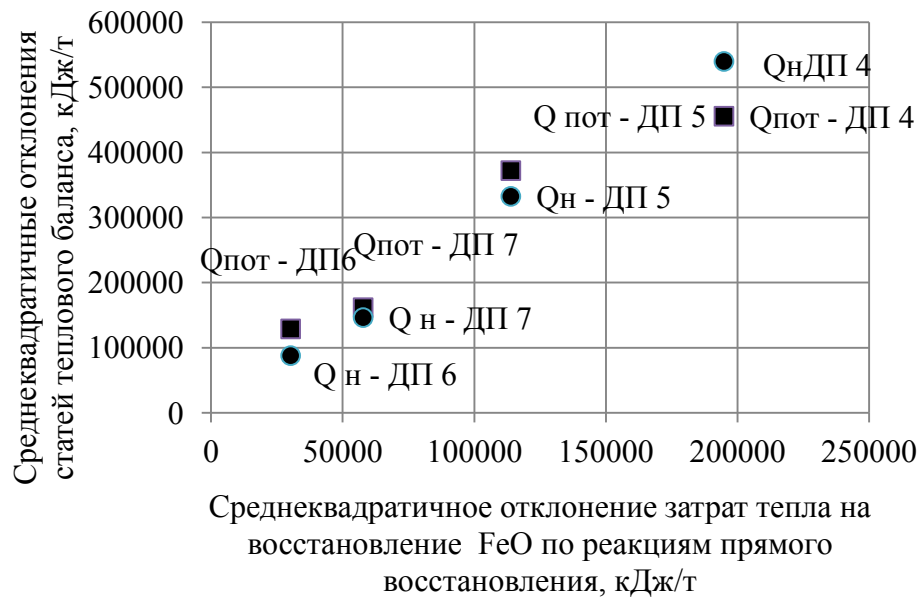


Рисунок 3 – Взаимосвязь между отклонением статей теплового баланса и колебанием затрат тепла на прямое восстановление FeO

Колебания затрат тепла на прямое восстановление FeO являются одним из основных факторов, определяющих расход тепла в нижней зоне печи. При этом наблюдаются колебания содержания FeO в первичных шлаках. Расход тепла на прямое восстановление оксидов железа во многом зависит от качества железорудных материалов.

Вследствие изменения качества железорудных материалов и изменения распределения рудной нагрузки по радиусу печи происходит изменение косвенного, и, как следствие, прямого восстановления оксидов железа. Возникающий дефицит или избыток тепла компенсируется технологическим персоналом путем изменения прихода тепла в нижнюю зону доменной печи. Это сопровождается изменением процессов теплообмена, как в верхней, так и в нижней зонах печи. При этом колебания потерь тепла сказываются на колебаниях состава продуктов плавки.

С целью поиска индикаторов для диагностики потерь тепла был произведен анализ производственных данных о работе доменных печей НЛМК. Из полученного анализа установлено, что на всех печах наблюдается наличие взаимосвязи между температурой периферийных газов и потерями тепла. Влияние температуры периферии на потери тепла усиливается при увеличении диапазона изменения температуры. Отсюда можно сделать вывод, что снижение потерь тепла может быть реализовано путем стабилизации работы периферийной зоны печи.

На следующем этапе был произведен анализ влияния температуры периферии на теплосъем с заплечиков. Полученный результат для доменной печи № 5 приведен на рисунке 4.

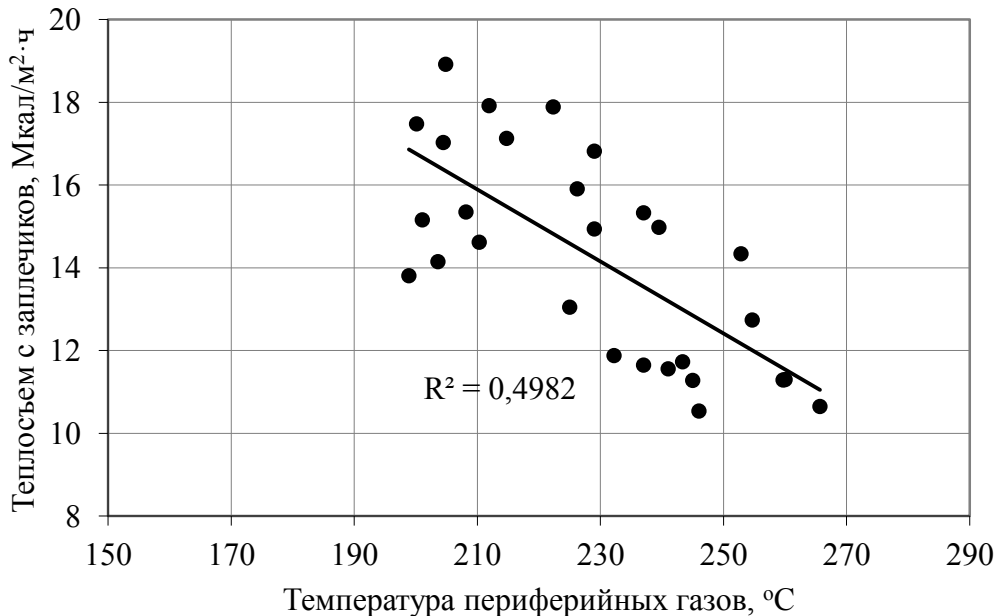


Рисунок 4 – Зависимость теплосъема от температуры периферии

Наблюдаемая зависимость теплосъема с заплечиков подтверждает тот факт, что снижение температуры периферийных газов, которое может быть объяснено уменьшением расхода газов, сопровождается снижением косвенного восстановления и увеличением содержания FeO в первичных шлаках. Это не способствует формированию устойчивого гарниссажа и повышает нагрузки на холодильники. Аналогичные зависимости наблюдаются на всех печах. При этом значения R^2 составляют 0,3-0,5.

Таким образом, актуальной задачей является изучение температурного поля и параметров газового потока в периферийной зоне доменной печи.

В современных условиях при высокой интенсивности плавки, содержанием железа в офлюсованной части шихты более 58 % и качестве сырья, обеспечивающим высокую скорость развития реакций восстановления оксидов железа роль тепловых эффектов реакций восстановления железа существенно возрастает. Это проявляется, в частности, в изменении отношения теплоемкостей потоков шихты и газа.

Среднее для верхней зоны печи отношение теплоемкостей потоков шихты и газов можно рассчитать по уравнениям:

$$m_{\text{шихта}} = 0.5 \cdot \left(1 + \frac{W_{\text{ШК}}}{W_{\text{ГК}}}\right), \quad (2)$$

$$m^{\text{температура}} = \frac{t_0 - t_K}{t_{\text{Ш0}} - t_{\text{ШК}}}, \quad (3)$$

где $W_{\text{ШК}}$, $W_{\text{ГК}}$ – теплоемкости потоков шихты и газа на колошнике, кДж/(мин·град); t_0 , t_K – температура газа в верхней зоне печи и на колошнике; $t_{\text{Ш0}}$, $t_{\text{ШК}}$ – температура шихтовых материалов в верхней зоне печи и на колошнике.

По данным о работе доменных печей НЛМК оценена взаимосвязь между отношением $m^{\text{температура}}$ к $m^{\text{шихта}}$ и степенью использования СО. Полученная зависимость для доменной печи № 5 приводится на рисунке 5.

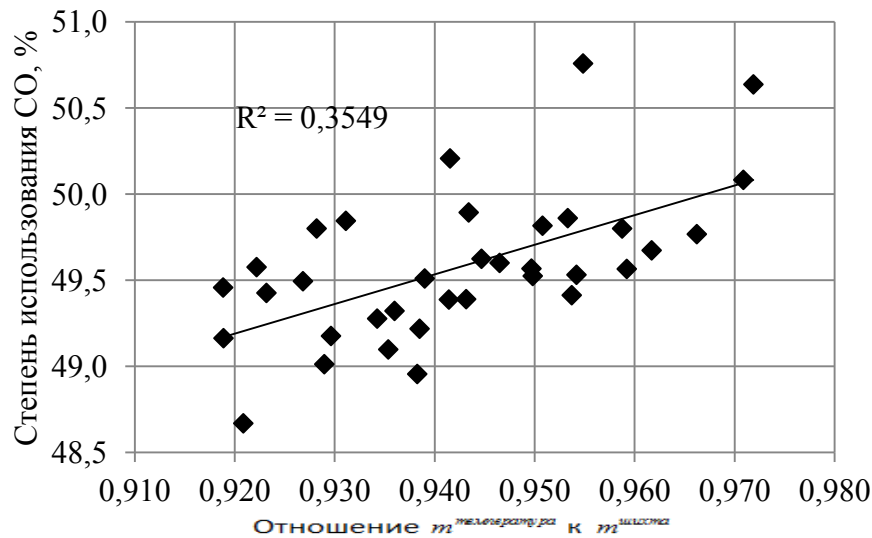


Рисунок 5 – Зависимости степени использования СО от отношения $m^{\text{температура}}$ к $m^{\text{шихта}}$ на доменной печи № 5

Аналогичные зависимости наблюдаются на всех печах. При этом значения R^2 составляют 0,3-0,4. Полученные данные подтвердили тот факт, что параметр $m^{\text{температура}}$ отражает восстановительную работу газового потока и может быть использован для оценки тепловых потерь в районе заплечиков и распара.

Установлено, что увеличение рудной нагрузки сопровождается повышением кажущейся теплоемкости шихты и, следовательно, протяженности верхней зоны печи.

Относительная высота верхней зоны доменной печи в периферийной области оценивается по уравнению:

$$H_{\text{ВЗП}}^{\text{П}} = H_{\text{ВЗП}} \cdot \frac{(1 - m^{\text{ПЕРИФЕРИЯ}})}{(1 - m^{\text{СРЕДНЕЕ}})}. \quad (4)$$

Данный подход является достаточно грубым и может дать только качественную оценку.

Из проведенного анализа установлено, что потери тепла, найденные с использованием теплового баланса нижней зоны печи, в достаточной степени

отражают такие технологические показатели как удельный расход кокса и содержание кремния в чугуна. То есть, допустимо использование математической модели для учета колебаний потерь тепла. Колебания потерь тепла сопровождаются колебаниями удельного расхода кокса и содержания кремния в чугуна. Снижения потерь тепла можно добиться за счет увеличения степени косвенного восстановления главным образом в периферийной области верхней зоны доменной печи, что в свою очередь, может быть достигнуто двумя путями: качеством железорудного материала и распределением рудной нагрузки по радиусу печи. Анализ производственных данных показал, что такая характеристика распределения материалов по радиусу печи, как отношение температуры периферии и колошниковога газа, действительно связана с потерями тепла. Это подтверждается относительным изменением высоты верхней зоны печи.

В третьей главе представлены результаты исследований и разработаны рекомендации по управлению тепловым состоянием периферийной области верхней зоны печи.

Разработана методика анализа влияния параметров загружаемой шихты на высоту верхней ступени теплообмена. По полученным данным в ходе аналитического обзора было установлено, что степень косвенного восстановления и степени использования СО зависят от времени пребывания шихты в зоне косвенного восстановления. Этот факт подтверждается как литературными источниками, так и данными о работе доменных печей ПАО НЛМК, которые приводятся на рисунке 6.

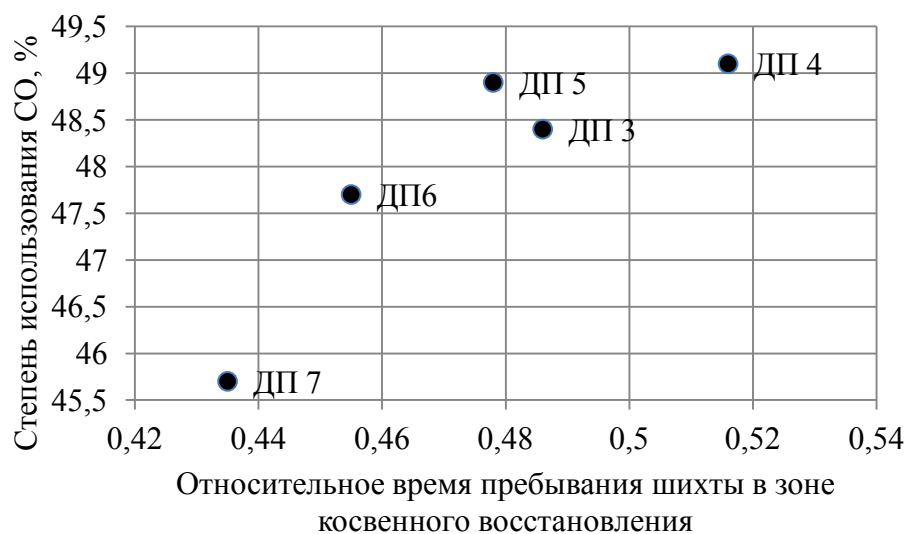


Рисунок 6 – Зависимость степени использования СО от времени пребывания шихты в зоне косвенного восстановления

Эти данные в полной мере подтверждают тот факт, то протяженность верхней зоны доменной печи во многом определяет степень использования СО и степень косвенного восстановления.

Целью данного раздела исследований является оценка влияния гранулометрического состава агломерата и рудной нагрузки на протяженность верхней зоны печи. Было получено уравнение для расчета изменения протяженности верхней зоны печи:

$$\frac{\Delta H}{H} = - \left(\frac{m \cdot 0.5}{m - 0.5} \right) \frac{\Delta V_{\Gamma}}{V_{\Gamma}} - 0,9 \cdot \frac{\Delta w_{\Gamma}}{w_{\Gamma}} - 0,3 \cdot \frac{\Delta T}{T} + 0,75 \frac{\Delta d}{d} + \left(1 + \frac{m \cdot 0.5}{m - 0,5} \right) \cdot \frac{\Delta W_{ш}}{W_{ш}}, \quad (5)$$

где V_{Γ} – удельное количество газа на единицу шихты; w_{Γ} – скорость газового потока; T – температура газа.

Уравнение (5) не учитывает внутреннюю теплопередачу и справедливо только для термически тонких тел. Поэтому при учете влияния рудной нагрузки и диаметра кусков ЖРМ анализ чувствительности уравнения к изменению результатов расчета показал, что данное уравнение можно использовать только для анализа при относительном изменении $\frac{\Delta d}{d} \leq 0,1$.

Воздействовать на высоту верхней зоны печи можно двумя основными способами, а именно, путем изменения рудной нагрузки и за счет изменения гранулометрического состава шихтовых материалов. При изменении рудной нагрузки изменяются как $W_{ш}$, так и V_{Γ} . Чем выше температура газов и меньше отношение теплоемкостей потоков шихты и газов, тем в большей степени сказывается изменение количества газов на протяженность верхней зоны доменной печи. При высоких температурах газа влияние изменения его скорости на высоту верхней зоны печи существенно возрастает. Следовательно, можно ожидать, что при низких температурах газа в периферийной зоне печи будут наблюдаться существенные изменения степени косвенного восстановления оксидов железа и содержания FeO в первичных шлаках.

Влияние $W_{ш}$ во многом проявляется за счет изменения тепловых эффектов реакций.

Влияние рудной нагрузки на высоту верхней зоны печи обусловлено изменением среднего диаметра слоя шихты. Для оценки влияния рудной нагрузки на изменение диаметра кусков слоя получено следующее уравнение:

$$\frac{\Delta d}{d} = - (0,0404 + 0,0002 \cdot P_{н} - 0,0004 \cdot P_{н}^2) \cdot \frac{\Delta P_{н}}{P_{н}} \quad (7)$$

Изменение диаметра кусков слоя и порозности слоя приводит к изменению удельного газодинамического сопротивления и, как следствие, к снижению скорости газа и его количества. Для расчета влияния изменения рудной нагрузки на скорость газа и его количества получены следующие уравнения.

$$\frac{\Delta w_{\Gamma}}{w_{\Gamma}} = (-0,0565 - 0,0173 \cdot P_{\text{H}} + 0,0019 \cdot P_{\text{H}}^2) \cdot \frac{\Delta P_{\text{H}}}{P_{\text{H}}}, \quad (8)$$

$$\frac{\Delta V_{\Gamma}}{V_{\Gamma}} = (-0,0286 - 0,009 \cdot P_{\text{H}} + 0,001 \cdot P_{\text{H}}^2) \cdot \frac{\Delta P_{\text{H}}}{P_{\text{H}}}. \quad (9)$$

Разработана математическая модель для оценки влияния диаметра кусков агломерата на высоту верхней зоны печи, построенная в приращениях. Расчет выполнялся при изменении диаметра кусков агломерата на 1 мм. Графические зависимости, полученные по результатам работы, представлены на рисунках 7-10.

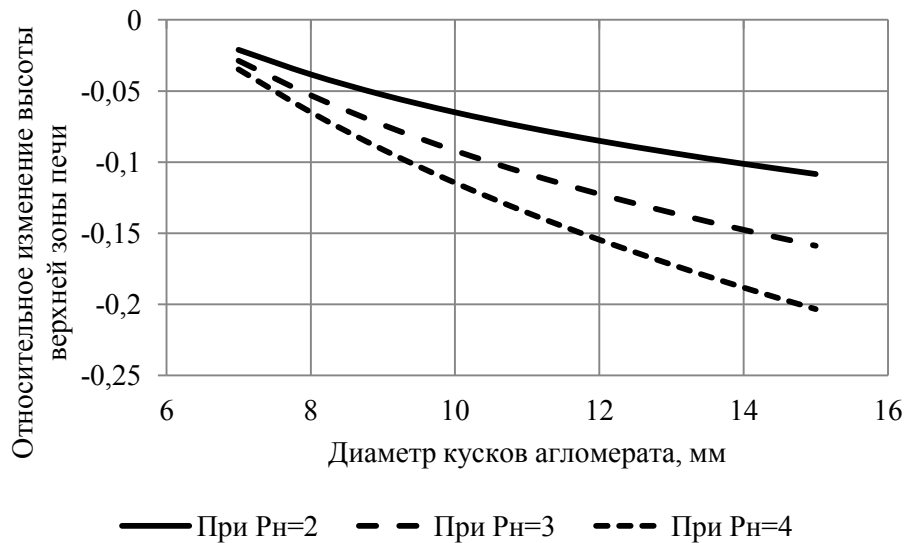


Рисунок 7 – Влияние диаметра кусков агломерата на изменение высоты верхней зоны печи

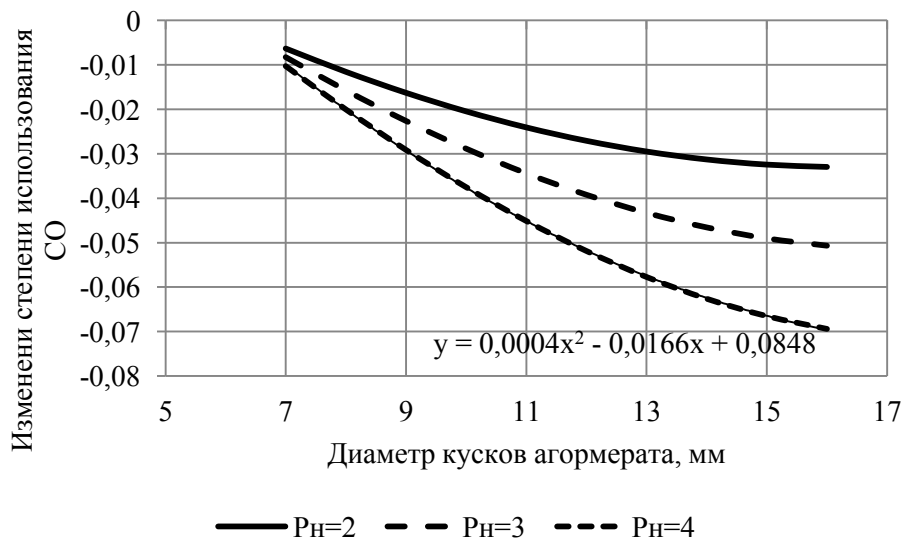


Рисунок 8 – Влияние диаметра кусков агломерата на изменение степени использования CO при $\frac{\eta_{\text{CO}}}{\eta_{\text{CO}}^{\text{Равн}}} = 0,7$

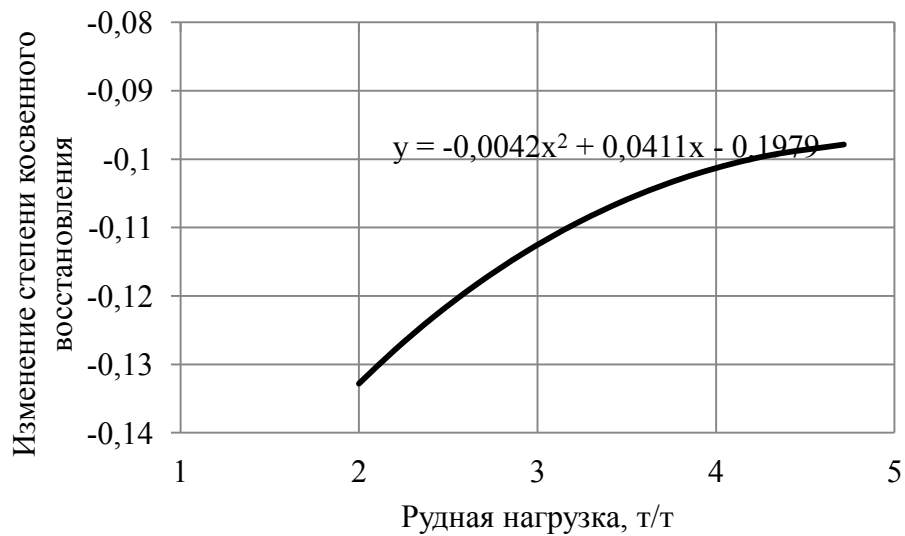


Рисунок 9 – Зависимость изменения степени косвенного восстановления от рудной нагрузки при увеличении R_n на 0,1

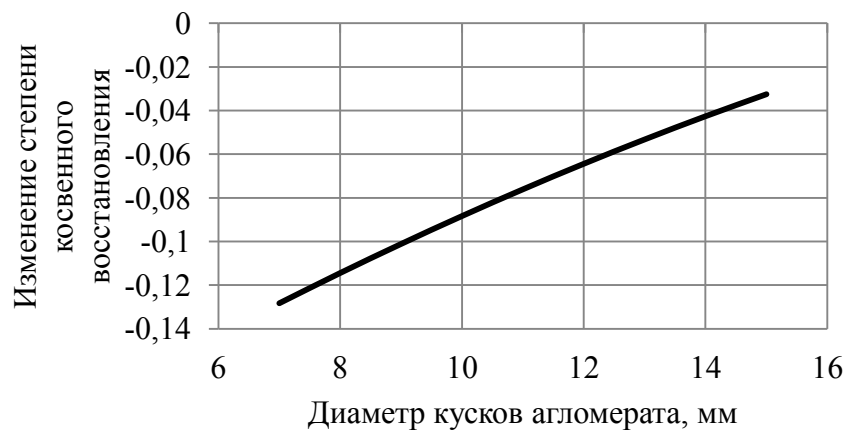


Рисунок 10 – Влияние диаметра кусков агломерата на изменение степени косвенного восстановления при увеличении диаметра куска на 1 мм

Как показано выше, изменение температурного поля в верхней зоне доменной печи может быть вызвано изменением рудной нагрузки или гранулометрического состава ЖРМ. Полученные выше зависимости позволяют оценить изменения степени использования CO (η_{CO}) и температуры газов при действии того или иного фактора. Выполнены расчеты, позволяющие определить совместное изменение степени использования CO и температуры периферии при изменении гранулометрического состава и рудной нагрузки. При моделировании рудной нагрузки применялось изменение на 0,1 (абсолютную) при разном базовом значении. При моделировании влияния изменения диаметра кусков шихты принималось относительное изменение d/d на 0,1 при разном базовом значении диаметра. Результаты моделирования для доменной печи № 5 и № 7 приведены на рисунках 11-12.

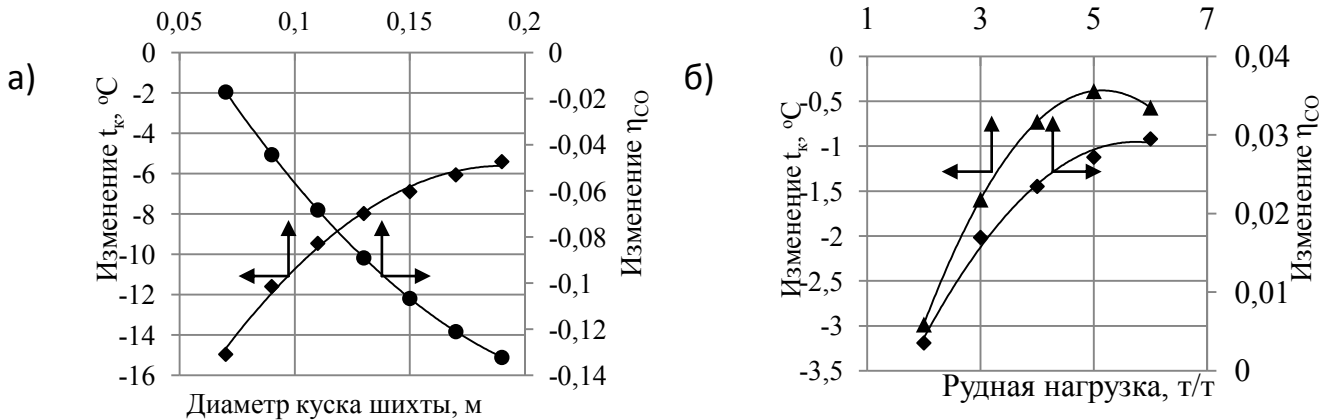


Рисунок 11 – Влияние диаметра кусков шихты (а) и рудной нагрузки (б) на t_k и η_{CO} на доменной печи № 5

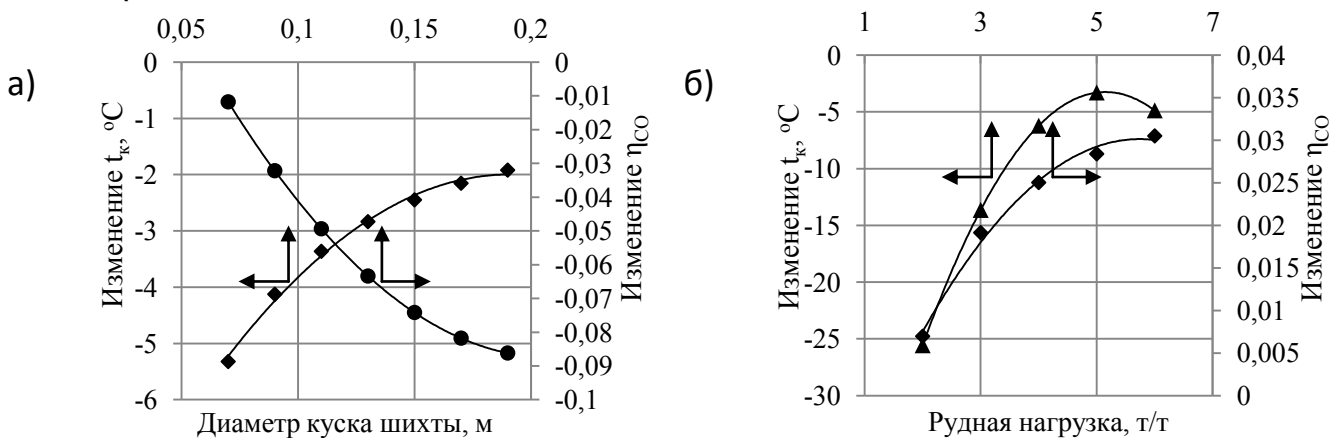


Рисунок 12 – Влияние диаметра кусков шихты (а) и рудной нагрузки (б) на t_k и η_{CO} на доменной печи № 7

Из полученных данных можно сделать вывод о том, что при изменении рудной нагрузки происходит однонаправленное изменение температуры периферии и степени использования CO, а при изменении гранулометрического состава наблюдается разнонаправленное изменение. При низких базовых значениях рудной нагрузки (< 4) диапазон изменения параметров больше.

Разработана методика, позволяющая оценивать влияние гранулометрического состава агломерата на время восстановления куска по реакциям косвенного восстановления.

Для анализа влияния гранулометрического состава агломерата на удельное газодинамическое сопротивление слоя (ΔP_w) и начальную скорость восстановления оксидов железа ($\Delta m/\Delta t$) использованы данные о гранулометрическом составе скипового агломерата. Максимальные, минимальные и средние значения содержания фракций, а также рассчитываемых показателей приводятся в таблице 1.

Таблица 1 – Данные о гранулометрическом составе агломератов.

	Фракционный состав, %					ΔP_w	$\Delta m/\Delta t$
	5-10	10-25	25-40	40	-5		
Минимальное значение	4,00	28,90	6,90	1,90	0,90	234	945
Максимальное значение	42,50	58,30	31,10	24,60	11,50	1811	5014
Среднее значение	22,04	45,01	14,87	12,77	5,32	842	2732

При моделировании рассматривались варианты, при которых выводится та или иная фракция, а доля других фракций пропорционально возрастает.

Результаты расчета показали, что при исключении фракции +40 практически для агломератов всех партий удельное газодинамическое сопротивление слоя агломерата снижается. При этом начальная скорость восстановления растет. Наилучшие результаты достигаются для агломератов с наибольшим содержанием фракции 10-25 мм. Следует учитывать, что доменные печи НЛМК работают с долей окатышей в шихте около 40 %. Ввод в шихту окатышей увеличивает долю фракции 10-25 мм, что в смеси с агломератом повышает газопроницаемость слоя. Поэтому при работе доменных печей с вдуванием ПУТ целесообразно исключить из состава шихты фракцию +40 мм.

Влияние доли фракции -5 мм при существующем агломерате и при агломерате, в котором отсутствует фракция +40 мм, на скорость восстановления оксидов железа и количество газов приводится на рисунке 13.

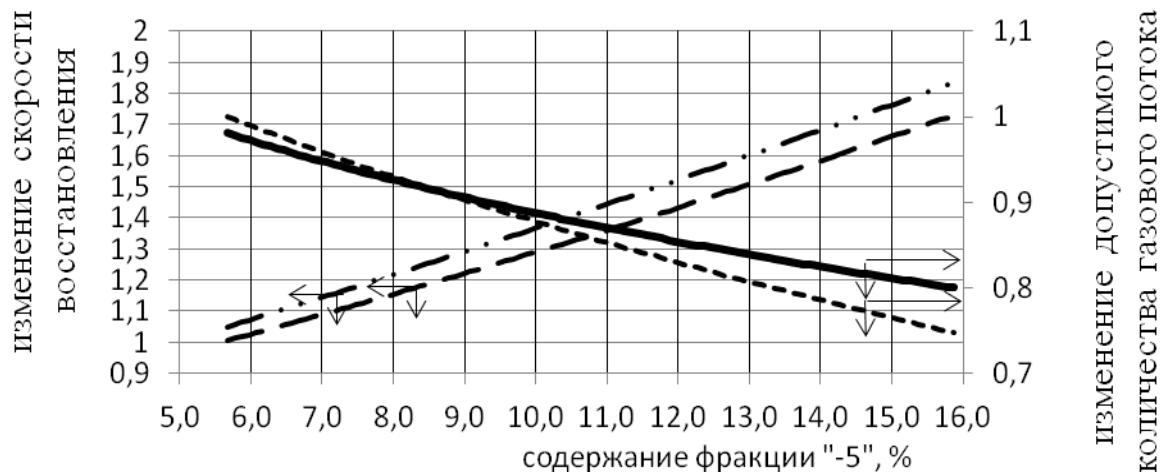


Рисунок 13 – Изменения скорости восстановления шихтовых материалов и количества газового потока от гранулометрического состава:

- изменение скорости восстановления
- изменение допустимого количества газов
- - изменение допустимого количества газов при отсутствии класса +40
- изменение скорости восстановления при отсутствии класса +40

Полученные в ходе исследования зависимости показывают, что увеличение содержания фракции +40 мм на 1% снижает скорость восстановления на 4% и удельное газодинамическое сопротивление на 3%. В свою очередь, увеличение количества фракции -5 мм на 1% увеличивает скорость восстановления и удельное газодинамическое сопротивление на 9%.

Анализ результатов позволил сформулировать рекомендации по выбору гранулометрического состава, которые представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Критерии для выбора гранулометрического состава

Содержание фракции, %					ε	$\Delta P_{ш}$	$\Delta m/\Delta t$
5-10	10-25	25-40	+40	-5			
< 20	≥ 40	≥ 17	< 6	< 6	0,41-0,45	<900	≥ 2000

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненной работы достигнута поставленная цель и получены следующие результаты:

1. Разработана методика расчёта температуры газа и его восстановительной работы в периферийной зоне доменной печи. Она может быть использована для оптимизации теплового состояния шахты печи в периферийной зоне.

2. Установлено, что при снижении температуры периферийных газов наблюдается повышение тепловых нагрузок на холодильники заплечиков. Это обстоятельство позволяет использовать данную информацию для управления распределением материала по сечению доменной печи.

3. Уменьшение температуры газов в периферийной зоне печи сопровождается изменением степени косвенного восстановления (R_i). Этот факт позволяет рассматривать температуру периферии как индикатор развития косвенного восстановления.

4. Выявлены факторы, определяющие потери тепла в доменной печи и способы их оценки. Установлено, что потери тепла, найденные с использованием теплового баланса нижней зоны печи, в достаточной степени отражают такие технологические показатели, как удельный расход кокса и содержание кремния в чугуне. То есть, допустимо использование математической модели для учета колебаний потерь тепла.

5. Снижение потерь тепла можно добиться за счет увеличения степени косвенного восстановления, что в свою очередь, может быть достигнуто двумя путями: качеством железорудного материала и распределением рудной нагрузки по радиусу печи. Анализ производственных данных показал, что такая характеристика распределения материалов по радиусу печи, как отношение температуры периферии и колошниковога газа, действительно связана с потерями тепла. Это подтверждается относительным изменением высоты верхней зоны печи.

6. Получено уравнение для расчета изменения протяженности верхней зоны печи, учитывающее изменение количества и скорости газов, изменение качества ЖРМ, а также теплоемкость потока шихтовых материалов.

7. Изменение рудной нагрузки является одним из способов управления тепловым состоянием периферийной области доменной печи. Доказано что влияние рудной нагрузки при различном гранулометрическом составе ЖРМ проявляется по-разному.

8. Разработана математическая модель, позволяющая оценить влияние гранулометрического состава агломерата на время восстановления куска по реакциям косвенного восстановления.

9. Научно обоснован, разработан и внедрен комплекс рекомендаций по совершенствованию оценки влияния рудной нагрузки на развитие теплообмена и восстановления в периферийной зоне доменной печи установлено, что наилучшие условия восстановления оксидов железа достигаются при содержании фракции «5-25» мм более 75%. При этом доля фракции «-5» и «+45» мм не должна превышать 6%.

10. В результате теоретического анализа установлено, что эффективное управление восстановительной работой газов в периферийной зоне печи может быть реализовано при высоком качестве ЖРМ (когда порозность слоя агломерата и порозность слоя кокса близки).

11. Выполнены расчеты, позволяющие определить совместное изменение степени использования СО и температуры периферии при изменении гранулометрического состава и рудной нагрузки, в результате которых установлено, что при изменении рудной нагрузки происходит однонаправленное изменение температуры периферии и степени использования СО, а при изменении гранулометрического состава наблюдается разнонаправленное изменение. При низких базовых значениях рудной нагрузки (<4) диапазон изменения параметров больше. На доменных печах, где средняя рудная нагрузка достигает 5 и более, а температура периферии выше 200 °С, диапазон изменения температуры периферии незначительный.

12. Результаты диссертационного исследования могут быть использованы для совершенствования выплавки чугуна в доменных печах и служить основой при принятии реконструктивных и проектных решений.

Перспективы дальнейшей разработки темы. Разработанные в диссертации основные положения и методики расчета рекомендуется в перспективе использовать для проектирования технологии по снижению потерь тепла при выплавке чугуна в доменных печах.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК:

1. Джимо С.О. Исследование возможности управления тепловой работой периферийной зоны доменной печи / С.О. Джимо, А.В. Лозович, С.А. Загайнов // Известия высших учебных заведений. Чёрная металлургия. 2014. № 7. С. 66-67. (0,12 п.л./0,04 п.л.).

2. Джимо С.О. Оценка возможности управления тепловым состоянием верха доменной печи в периферийной области / С.А. Загайнов, С.В. Филатов, Л.Ю. Гилева, А.В. Лозович, С.О. Джимо // Известия высших учебных заведений. Чёрная металлургия. – 2016. - № 6, Т. 59 – С. 371-377. (0,39 п.л./0,13 п.л.).

3. Jimoh S.O. Controlling the peripheral temperature of the blast furnace / S.A. Zagainov, S.V. Filatov, L.Y. Gileva, A.V. Lozovich, S.O. Jimoh // Steel in Translation, Vol. 46, Issue 6, June 2016, p. 378-383. (0,33 п.л./0,11 п.л.).

4. Jimoh S., Energy efficient technology to produce hot metal from titania-magnetite ore / S. Zagainov, V. Fillipov, S. Filatov, Y. Gordon, L. Gileva, S. Jimoh, A. Lozovich // AISTech - Iron and Steel Technology Conference Proceedings. Vol. 1, 2016. P. 559-566. (0,44 п.л./0,13 п.л.).

Другие публикации:

5. Jimoh S.O. Assessment of Granulometric Composition of Ore Materials and Ore Load on Developmental Regenerative Processes in the Peripheral Zone of the Blast Furnace / S.O. Jimoh, S.A. Zagainov, A.V. Lozovich, L.U. Gileva. // International Journal of Metallurgical & Materials Science and Engineering/ Vol. 5. Issue 2. April 2015. P. 7-16. (0,55 п.л./0,18 п.л.).

6. Jimoh S.O. Оценка влияния восстановительной работы газового потока на температуру колошникового газа / А.В. Лозович, S.O. Jimoh, С.А. Загайнов // Инновации в материаловедении и металлургии. Материалы III Международной интерактивной научно-практической конференции. Екатеринбург, 2013. С. 4-6. (0,12 п.л./0,04 п.л.).

7. Джимо С.О. Влияние качества агломерата на показатели доменной плавки / А.В. Лозович, С.О. Джимо, С.А. Загайнов // XV Международная научно-техническая уральская школа-семинар металлургов-молодых учёных. Екатеринбург, 2014. С. 7-9. (0,12 п.л./0,04 п.л.).

8. Джимо С.О. Разработка методов моделирования теплообмена в периферийной зоне доменной печи / А.В. Лозович, С.О. Джимо // Творческое наследие В.Е. Грум-Гржимайло: История, современное состояние, будущее. сборник докладов международ. конф. Екатеринбург, 2014. Ч. 2. С. 233-237. (0,28 п.л./0,14 п.л.).

9. Джимо С.О. Разработка методов оценки влияния гранулометрического состава на показатели доменной плавки / А.В. Лозович, С.О. Джимо // Инновации в материаловедении и металлургии: материалы III Международной интерактивной научно-практической конференции. Екатеринбург, 2013. С. 7-9. (0,17 п.л./0,08 п.л.).

10. Джимо С.О. Влияние качества агломерата на показатели работы доменной плавки / А.В. Лозович, С.О. Джимо, С.А. Загайнов // Инновации в материаловедении и металлургии: материалы IV Международной интерактивной научно-практической конференции. Екатеринбург, 2015. С. 21-24. (0,22 п.л./0,07 п.л.).

11. Джимо С.О. Влияние рудной нагрузки на степень косвенного восстановления в доменной печи / А.В. Лозович, С.О. Джимо, С.А. Загайнов // Инновации в материаловедении и металлургии. Материалы IV Международной интерактивной научно-практической конференции. Екатеринбург, 2015. С. 24-28. (0,28 п.л./0,09 п.л.).

12. Jimoh S.O. Analysis of the characteristics of the blast Furnace peripheral zone / S.O. Jimoh, S.A. Zagaynov, C.B. Pyhteeva // International Journal of Scientific & technology research. -2013. – vol. 2, Issue 9. – P. 125-128. (0,22 п.л./0,07 п.л.).