

На правах рукописи

Харченко Елена Олеговна

**Научное и технологическое обоснование эффективного использования
некондиционного агломерата в доменных печах**

Специальность 2.6.2. Metallургия черных, цветных и редких металлов

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Магнитогорск – 2021

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

Научный руководитель доктор технических наук, доцент
Сибатуллин Салават Камилович.

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

Шаповалов Алексей Николаевич, кандидат технических наук, доцент Новотроицкий филиал ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», заместитель директора по инновациям и развитию, заведующий кафедрой металлургических технологий и оборудования

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)».

Защита состоится 14 декабря 2021 года в 15⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 24.2.324.01, на базе ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, малый актовй зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Автореферат разослан «__» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Мезин Игорь Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Согласно Парижскому соглашению по климату странам-участницам необходимо сократить выбросы CO₂ в воздушную атмосферу планеты на 45 % к 2030 году по сравнению с уровнем 2010 года для удержания роста глобальной средней температуры на уровне, составляющем не более 2 °С от доиндустриальной величины. Совокупный объём промышленных выбросов CO₂ в 2018 г достиг 33,9 млрд. т. Для этого важно снижение углеродного следа при производстве металла. Промышленные предприятия Российской Федерации занимают четвертое место по выбросу диоксида углерода в атмосферу. Развитие чёрной металлургии России продолжается – с 2016 г объём инвестиций в него увеличивается и в 2020 г он составил около 300 млрд. руб. Доменное производство является основным потребителем кокса – источника углерода, переходящего в последующем в CO₂. На долю производства чугуна в доменных печах приходится около 60 % энергоресурсов, используемых черной металлургией.

Удельное потребление кокса, производительность и срок службы доменных печей зависят от своевременности принятия технологических решений: состав и расположение компонентов железорудного сырья и кокса в колошниковом пространстве при загрузке, состав, температура и интенсивность дутья, вдувание дополнительных компонентов.

Наиболее высокие технико-экономические показатели доменной плавки достигаются при применении качественных шихтовых материалах, в том числе агломерата: по химическому составу, физико-механическим, физико-химическим, температурно-тепловым свойствам. Однако для недопущения потерь железа с произведенным агломератом, не соответствующим требованиям, в состав шихты доменных печей включают агломерат, некондиционный по одному или нескольким параметрам: высокое содержание мелких фракций, отличие от заданных пределов по химическому и ситовому составу, ухудшенные свойства по прочности. Причины образования некондиционного агломерата различны. Чаще всего это атмосферное воздействие на него при хранении на специализированных площадках с целью обеспечения стабильного снабжения доменных печей сырьём в период остановок агломерационных фабрик, отсутствия поставок окатышей, появления отклонений в технологическом регламенте производства агломерата.

Среднегодовая доля некондиционного агломерата в аглоцехе составляет около 15 % от его общей массы. При этом содержание этого агломерата на отдельных доменных печах может достигать 30 % от железорудной части шихты. Ввод его в состав сырья осложняет ход процессов получения чугуна, что увеличивает удельное потребление кокса и снижает производительность печей. В связи с этим диссертационная работа по научному и технологическому обоснованию эффективного использования некондиционного агломерата в доменных печах является актуальной.

Степень разработанности темы исследования

Проведенный литературно-патентный обзор по применению в доменном производстве некондиционного агломерата показал целесообразность разработки эффективного режима его использования в доменных печах, в том числе в оснащённых однокотловым компактным бесконусным загрузочным устройством (БЗУ) лоткового типа, по следующим причинам:

- необходимо обеспечить воздействие на локальные зоны доменной печи по окружности и радиусу колошника: на химический состав, физико-механические, физико-химические, температурно-тепловые свойства шихты;

- нужен учёт индивидуальности режимов загрузки и работы доменных печей: состав железорудного сырья, добавочных материалов, масса материала, выгружаемого одновременно в колошниковое пространство, матрица загрузки, вид загрузочного устройства, условия работы доменных печей по газодинамике.

Цель работы – разработка эффективного режима использования некондиционного агломерата в доменных печах, оснащённых однокотловым компактным БЗУ лоткового типа, для повышения их производительности и снижения удельного расхода кокса.

Задачи

- оценить химический состав, физико-механические и физико-химические свойства некондиционного агломерата;

- исследовать характер распределения по крупности некондиционного агломерата, поступающего со станций углового положения лотка в колошниковом пространстве для различных условий загрузки;

- разработать алгоритм выбора печи в доменном цехе для загрузки в нее некондиционного агломерата;

- выявить, обосновать и внедрить эффективные режимы загрузки некондиционного агломерата в доменные печи.

Научная новизна работы

1. Разработаны зависимости распределения некондиционного агломерата по крупности в колошниковом пространстве печи при загрузке его в смеси с кондиционным агломератом, окатышами и добавочными материалами для условий односкипового и двухскипового режимов наполнения бункера БЗУ лоткового типа.

2. Определено влияние распределения некондиционного агломерата и коксовой фракции по кольцевым зонам колошникового пространства на изменение коэффициента сопротивления шихты в верхней части печи. В ПАО «ММК» снижению его величины на 3,78 % отн. способствовало уменьшение отношения содержаний некондиционного агломерата и коксовой фракции с 2,43 до 0,73 на периферии при увеличении данного отношения с 0,98 до 1,09 в зоне рудного гребня и с 0,66 до 0,97 в промежуточной зоне между периферией и рудным гребнем.

3. Установлено влияние на газодинамику верхней и нижней зон доменной печи совместной загрузки некондиционного агломерата с марганцевой рудой. В ПАО «ММК» стабильную работу печи обеспечило применение марганцевой

руды Ниязгуловского месторождения в количестве 3,34 кг на 1 % некондиционного агломерата при сдерживании процесса доменной плавки высоким сопротивлением шихты и газов в верхней части печи и 1,98 кг на 1 % некондиционного агломерата в условиях определяющей роли газодинамики нижней части.

Практическая ценность и реализация результатов

Полученные в работе результаты позволили повысить эффективность использования некондиционного агломерата при производстве чугуна в доменных печах ПАО «ММК». Внедрены эффективные режимы загрузки коксовой фракции в смеси с некондиционным агломератом в соотношении 2-2,5 кг/т чугуна фракции на каждый процент некондиционного агломерата размещением их преимущественно в зоне с максимальной рудной нагрузкой и промежуточной зоне между периферией и рудным гребнем. Применение разработанного режима по сравнению с существующим порядком загрузки некондиционного агломерата обеспечивало снижение удельного расхода кокса на 3,3 кг/т чугуна при повышении производительности печи на 53,5 т/сутки.

Результаты, полученные при выполнении диссертационной работы, используются в системе подготовки бакалавров, магистров и преподавателей-исследователей в ФГБОУ ВО «МГТУ им Г.И. Носова» по направлениям 22.03.02, 22.04.02, 22.06.01.

Методология и методы исследования

Физическое моделирование режимов загрузки некондиционного агломерата проведено на укрупнённой лабораторной установке БЗУ лоткового типа, оснащенной скиповой системой загрузки, изготовленной в масштабе 1 : 5 БЗУ доменных печей полезным объёмом 1370 м³ ПАО «ММК» (поперечные размеры 1,6x1,5 м, высота 3,72 м, масса 1,2 т). Математическое моделирование проведено с соблюдением критериев подобия.

Проведены промышленные эксперименты на доменных печах №№ 4, 6, 9 и 10 ПАО «ММК», которые включали следующие этапы: изучение объекта исследования, разработка, научное и технологическое обоснование эффективных режимов использования некондиционного агломерата, проведение опытных плавок по выявленным рациональным режимам, внедрение результатов исследований в производство.

Физико-механические свойства некондиционного агломерата оценивали в соответствии с ГОСТ 27562-87, 25732-88, 2409-95.

Положения, выносимые на защиту

На защиту выносятся следующие новые научные результаты:

1. Зависимости распределения некондиционного агломерата по станциям углового положения лотка в смеси с кондиционным агломератом, окатышами и добавочными материалами для условий односкипового и двухскипового режимов наполнения бункера БЗУ.

2. Эффективные технологически обоснованные режимы загрузки некондиционного агломерата в смеси с коксовой фракцией в кольцевые зоны колошникового пространства доменной печи.

3. Результаты совместной загрузки некондиционного агломерата с марганцевой рудой в доменные печи, работающие в условиях сдерживания процесса выплавки чугуна интенсивностью его хода в верхней и нижней их частях.

Достоверность полученных результатов

Подтверждается использованием ГОСТ 27562-87, 25732-88, 2409-95 в процессе исследований физико-механических свойств некондиционного агломерата, применением критериев подобия при моделировании режимов загрузки некондиционного агломерата на модели лоткового ЗУ, неоднократными экспериментами на производстве при исследовании различных режимов загрузки некондиционного агломерата.

Личный вклад автора заключается

Все результаты, приведенные в диссертации, получены самим автором и при его непосредственном участии. Вклад автора заключается в формулировании цели и задач исследования, организации и проведении лабораторных и промышленных экспериментов, анализе и интерпретации результатов исследования, разработке алгоритма выбора печи в доменном цехе для загрузки в нее некондиционного агломерата, формулировке основных положений и выводов.

Апробация работы

Основные положения работы доложены и обсуждены на следующих конференциях: XVI Международном конгрессе сталеплавильщиков и производителей металла (Россия, Екатеринбург-Первоуральск, 2021 г); VIII и IX Международных конгрессах доменщиков (Россия, Москва, 2016 г. «Металлургия чугуна – вызовы XXI века»; Нижний Тагил, 2018 г. «Металлургия чугуна. Перспективы развития до 2025 г.»); 70,73,74,76,79-й Международных научно-технических конференциях «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» (Магнитогорск, 2012, 2015, 2016, 2018, 2021 гг.); 9-й Международной научно-технической конференции «Современная металлургия начала нового тысячелетия» (Липецк, 2012 г.); Международной научно-практической конференции «Теория и практика тепловых процессов в металлургии» (Екатеринбург, 2012 г.); II всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «ТИМ» с международным участием (Екатеринбург, 2013 г); XII-й всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Современные проблемы горно-металлургического комплекса» (Старый Оскол, 2015 г.); XIX-й Международной научно-практической конференции «Металлургия: технологии, инновации, качество» (Новокузнецк, 2015 г.); IV международном промышленном форуме «Реконструкция промышленных предприятий – прорывные технологии в металлургии и машиностроении» (Челябинск, 2011 г.);

Межрегиональной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и производство Урала» (Новотроицк, 2012 г).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 26 научных трудов, из них 7 публикаций в рецензируемых журналах (5 статей – в журналах из перечня, рекомендованного ВАК РФ и 2 статьи – в журналах, индексируемых в международных базах Web of Science, Scopus), 2 патента РФ на изобретение, 4 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографического списка из 134 наименований и 2 приложений. Она изложена на 126 страницах машинописного текста, содержит 45 рисунков и 41 таблицу.

Основное содержание работы

Во введении изложена актуальность тематики исследований, установлены цель работы, задачи, научная новизна и практическая значимость.

В первой главе проанализированы научные публикации, отражающие требования, предъявляемые к качеству железорудного сырья, опыт использования мелких фракций агломерата в шихте доменных печей, особенности их загрузки лотковым загрузочным устройством, способы оценки газодинамического состояния в верхней части печи.

Из анализа изученных работ следует, что необходимо научное и технологическое обоснование эффективного использования некондиционного агломерата в доменных печах, учитывающее индивидуальность условий режимов загрузки, связанный с видом загрузочного устройства, состав шихтовых материалов. Отличие порозности шихты в локальных зонах печи по радиусу и окружности от рациональных величин приводит к снижению технико-экономических показателей ее работы. Опираясь на результаты литературного обзора, сформировали цель и задачи исследования.

Во второй главе приведены результаты лабораторных испытаний физико-механических свойств некондиционного агломерата по фабрикам ПАО «ММК» и в сравнении с агломератом текущего производства.

Для проведения исследований были отобраны пробы агломерата с фабрик № 2, 3 и 5, крупностью, представленной в табл. 1.

Таблица 1 – Средняя крупность агломерата фабрик ПАО «ММК»

Наименование показателей	Крупность агломерата (мм) по номерам фабрик		
	2	3	5
Эквивалентная по поверхности крупность, мм	12,1	11,1	13,6
Средневзвешенная крупность, мм	23,9	17,9	25,3
Однородность по крупности	0,51	0,62	0,54

В лаборатории кафедры Metallургии и химических технологий ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» определили гранулометрический состав; плотность (насыпную, среднюю и истинную); общую пористость порозность; угол естественного откоса; внутренний и наружный углы откоса при поступлении материала на горизонтальную поверхность по наклонной стальной поверхности, расположенной под углом к вертикали 30 и 50°; прочностные свойства агломерата в холодном состоянии и после восстановления при температуре 500 °С.

Оставшийся агломерат превратили в некондиционный путем складирования его в помещении сроком на один месяц с последующим пересыпанием, после чего повторно оценили различные свойства агломерата.

Изменения свойств некондиционного агломерата по сравнению с агломератом текущего производства заключаются в следующем:

- увеличилось содержание фракции 0-5 мм от 5,7 до 17,2 %;
- уменьшилась крупность – эквивалентная по поверхности от 12,3 до 7,4 мм, средневзвешенная от 22,4 до 14,3 мм;

- снизилась однородность по крупности на 5,2 %;

- ухудшились прочностные показатели:

- холодная прочность:

- уменьшилось сопротивление удару на 0,43 % (отн.);

- увеличились:

- разрушение годного агломерата на 0,43 % (отн.);

- истирание годного агломерата на 14,98 % (отн.);

- прочность после восстановления при температуре 500 °С:

- уменьшалось сопротивление удару на 3,72 % (отн.).

- увеличились:

- разрушение годного агломерата на 2,6 % (отн.).

- истирание годного агломерата на 8,74 % (отн.);

- степень восстановления при температуре 500 °С от 3,8 до 4,3 %, что обеспечило более высокое содержание FeO в некондиционном агломерате, равное 19,4 %, против 17,8 % у агломерата текущего производства.

В третьей главе приведены результаты промышленных исследований по влиянию расхода некондиционного агломерата на работу доменных печей № 4, 6 и 10 ПАО «ММК». В среднем рост содержания некондиционного агломерата в железорудной части шихты доменных печей № 10, 4 и 6 на 1 % в интервале 0 – 20,2 % сопровождался увеличением коэффициента сопротивления шихты движению газового потока в верху шахты на 0,98 %. Уменьшение интенсивности по дутью составило 0,19 %.

Производительность печей №№ 4, 6 и 10 снижалась на 33 т/сутки при повышении удельного расхода кокса на 2,5 кг/т чугуна на каждые 10 % увеличения доли некондиционного агломерата в составе железорудной части шихты.

Физическим и математическим моделированием установлены зависимости распределения некондиционного агломерата (5-30 % от массы железорудного сырья) по станциям углового положения лотка в смеси с кондиционным агломератом (20-65 % от массы железорудного сырья), окатышами (30-50 %) и добавочными материалами (суммарный расход не превышает 2 % от массы железорудного сырья). Для условий односкипового наполнения бункера получено новое уравнение, $R^2 = 0,55$:

$$A_{HEK} = -22,3 + 0,89A_{OK} + 36,8N_{cm} - 0,45A_{OK}N_{cm} - 3,83N_{cm}^2, \quad (1)$$

где A_{OK} – доля агломерата (0-100), располагающегося под окатышами и добавочными материалами в шихтовом бункере БЗУ;

$N_{ст}$ – порядковый номер оборота лотка в строке матрицы загрузки (в интервале 1-3).

Для условий двухскипового наполнения бункера получены зависимости, представленные на рис. 1 и 2.

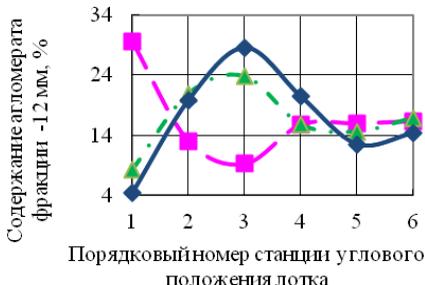


Рисунок 1 – Содержание некондиционного агломерата в зонах, соответствующих порядковому номеру станций углового положения лотка при двухскиповом заполнении бункера БЗУ по вариантам: поступление агломерата последним в первый скип (—■—), первым во второй скип (—◆—), последним во второй скип или первым в первый скип (—▲—)

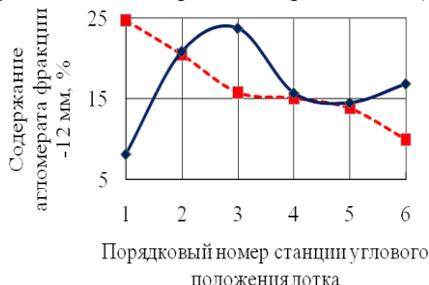


Рисунок 2 – Содержание некондиционного агломерата в зонах, соответствующих порядковому номеру станций углового положения лотка при двухскиповом заполнении бункера БЗУ по вариантам: поступление агломерата последним в первый и второй скипы (—■—), первым в первый и второй скипы (—◆—)

При размещении некондиционного агломерата в смеси с кондиционным агломератом в нижней части бункера БЗУ под окатышами и добавочными материалами (обеспечивается загрузкой агломерата наверх первого рудного скипа матрицы) получили уравнение с величиной $R^2 = 0,96$:

$$A_{\text{низ}}^{\text{нек}} = -1,0477N_{\text{ст}}^3 + 12,801N_{\text{ст}}^2 - 47,273N_{\text{ст}} + 64,973, \quad (2)$$

где $N_{\text{ст}}$ – порядковый номер станции углового положения лотка в строке матрицы загрузки (в интервале 1-6).

При размещении некондиционного агломерата в смеси с кондиционным агломератом в бункере БЗУ над окатышами и добавочными материалами (обеспечивается загрузкой агломерата вниз второго рудного скипа матрицы) получили уравнение с величиной $R^2 = 0,94$:

$$A_{\text{верх}}^{\text{нек}} = 1,2364N_{\text{ст}}^3 - 15,385N_{\text{ст}}^2 + 56,575N_{\text{ст}} - 38,887. \quad (3)$$

При размещении некондиционного агломерата в смеси с кондиционным агломератом в бункере БЗУ в среднем слое железорудного сырья (обеспечивается загрузкой агломерата вниз первого рудного скипа или наверх второго рудного скипа) получили уравнение с величиной $R^2 = 0,97$:

$$A_{\text{сеп}}^{\text{нек}} = 0,7704N_{\text{ст}}^3 - 9,5122N_{\text{ст}}^2 + 35,888N_{\text{ст}} - 21,297. \quad (4)$$

Использование результатов физического и математического моделирования применительно к текущим матрицам загрузки доменных печей № 2, 4, 6, 9 и 10 ПАО «ММК» позволило оценить возможность эффективного распределения некондиционного агломерата по радиусу колошникового пространства.

Для матрицы доменной печи № 6 (выгрузка содержимого одного скипа из бункера БЗУ) можно обеспечить размещение некондиционного агломерата в зоне рудного гребня и промежуточном пространстве между периферией и рудным гребнем двумя вариантами набора материалов.

Вариант 1. В первый рудный скип осуществляется загрузка некондиционного агломерата, затем основная масса шихтовых материалов. Тогда доля (в интервале 0-100 %) некондиционного агломерата по станциям углового положения лотка будет следующим:

номера станций	11	10	9	8	7	6	5	4
доля, %	0	6	30	47	17	0	0	0

Вариант 2. Во второй рудный скип осуществляется загрузка основной массы шихтовых материалов, после чего некондиционный агломерат. Тогда распределение некондиционного агломерата по станциям углового положения лотка будет следующим:

номера станций	11	10	9	8	7	6	5	4
доля, %	0	0	0	0	37	35	22	7

Предложен алгоритм выбора печей в доменном цехе ПАО «ММК» для загрузки в нее некондиционного агломерата, разработанный на основе времени пребывания материалов в противоточной зоне печи и показателя

уравновешивания силы тяжести железорудного сырья подъёмной силой газового потока. Для этого использовали систему уравнений 5.

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_{\text{ПГ}} = \frac{24 \cdot V_{\text{ПГ}}}{\Pi \cdot v_{\text{ш}}} \\ V_{\text{ПГ}} = V_{\text{П}} - (V_{\text{кз}} + V_{\text{изп}}) \\ V_{\text{кз}} = \frac{\pi \cdot h_3 \cdot d_{\text{к}}^2}{4} \\ V_{\text{изп}} = V_{\text{фл}} - \frac{(d_{\text{Г}} - 2 \cdot l_{\text{см}})^3}{4 \cdot f_0 \cdot (1 + m)} \\ V_{\text{фл}} = \frac{\pi \cdot h_{\text{фл}} \cdot d_{\text{Г}}^2}{4} \\ l_{\text{см}} = l_{\text{вф}} + l_{\text{рч}} \\ l_{\text{рч}} = \frac{1000}{\sqrt{K_{\text{ф}} \cdot d_{\text{ф}}}} \sqrt{\frac{V_{\text{ф}} \cdot \Pi}{86400 \cdot \pi \cdot n_{\text{ф}}}} \sqrt{\frac{\gamma_{\text{ф}} \cdot (t_{\text{зф}} + 273)}{546 \cdot (P_{\text{д}} + 1 - \Delta P_{\text{ф}}) \cdot h_{\text{дф}}}} \end{array} \right. \quad (5)$$

где Π – производительность печи, т/сутки; $v_{\text{ш}}$ – объём шихты, расходуемой для выплавки 1 т чугуна; $V_{\text{ПГ}}$ – объём противоточной зоны, м³; $\tau_{\text{ПГ}}$ – длительность пребывания материалов в противоточной зоне, час; h_3 – расстояние от верхней кромки колошника до поверхности шихты, м; $d_{\text{к}}$ – диаметр колошника, м; $d_{\text{Г}}$ – диаметр горна, м; $h_{\text{фл}}$ – высота горна от воздушных фурм до чугунных лётков, м; $V_{\text{кз}}$ – объём от верхней кромки колошника до уровня засыпи, м³; $V_{\text{изп}}$ – часть объёма горна, не относящаяся к зоне потока, м³; $V_{\text{фл}}$ – объём горна от оси воздушных фурм до оси чугунных лётков, м³; $l_{\text{см}}$ – расстояние от стенки горна до зоны малоподвижных материалов, м; f_0 – коэффициент внутреннего трения материалов; m – градиент вертикального давления, выраженный в долях насыпной плотности материала; $l_{\text{рч}}$ – протяжённость рыхлой части зоны в радиальном направлении, мм; $l_{\text{вф}}$ – высов фурм, м; $d_{\text{ф}}$ – диаметр фурм, м; $K_{\text{ф}}$ – соотношение между протяжённостью зоны циркуляции по окружности и диаметром фурм; $V_{\text{ф}}$ – выход фурменного газа, м³/т чугуна; $n_{\text{ф}}$ – количество фурм в работе; $\gamma_{\text{ф}}$ – плотность фурменного газа, кг/м³; $t_{\text{зф}}$ – температура газа на выходе из рыхлой части зоны горения, °С; $P_{\text{д}}$ – давление дутья, ати; $\Delta P_{\text{ф}}$ – потери напора дутья от места замера давления до торца фурм, ати; $h_{\text{дф}}$ – динамический напор газа на выходе из фурменного очага, Па.

Пример результатов расчёта длительности пребывания материалов в противоточной зоне в среднем по месяцам на одной из доменных печей объёмом 2014 м³ ПАО «ММК» в 2020 г.:

месяцы	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$\tau_{\text{ПГ}}$, час	4,02	3,84	4,25	3,83	3,96	3,96	4,22	4,13	4,06	4,14	4,40	4,14

Варианты использования результатов расчёта для распределения некондиционного агломерата на печах в зависимости от ситуации:

- уменьшение доли некондиционного агломерата пропорционально росту времени пребывания материалов в противоточной зоне ($\tau_{пр}$) для повышения интенсивности работы печей;

- увеличение доли некондиционного агломерата пропорционально уменьшению $\tau_{пр}$ для приближения интенсивности работы отстающих печей к передовым, имеющих для этого другие условия;

- вывод некондиционного агломерата из шихты печей, работающих наиболее интенсивно и с минимальной интенсивностью; распределение некондиционного агломерата по остальным печам;

- распределение некондиционного агломерата с дополнительным учётом газодинамических условий в верхней части печей – повышение её доли на тех из них, на которых наиболее низкое сопротивление шихты движению газа.

Распределение некондиционного агломерата с дополнительным учётом газодинамических условий в верхней части печей рассмотрели расчётом показателя уравнивания силы тяжести железорудного сырья подъёмной силой газового потока (критерия K_j) для каждой доменной печи:

$$K_j = h_{dk} / J_p; \quad (6)$$

где h_{dk} – динамический напор газа, кг/м²;

J_p – интенсивность загрузки железорудного сырья, т/(м³ сутки).

Доменные печи, работающие с низкой величиной K_j , характеризуются пониженной напряженностью взаимного сопротивления потоков шихты и газа в верхней их части. В связи с этим на них возможно приоритетное использование некондиционного агломерата. По мере увеличения величины K_j приоритетность использования некондиционного агломерата уменьшается.

В четвертой главе представлены результаты разработки и обоснования эффективных режимов загрузки некондиционного агломерата в колошниковое пространство проведением исследований на доменных печах №№ 4, 6, 9 и 10 ПАО «ММК».

На доменных печах №№ 6 и 9 установили, что загрузка некондиционного агломерата в количестве до 13,7 % от расхода железорудной части шихты, с одновременным увеличением доли окатышей на 0,56 % в интервале 31,1-37,9 % на каждый процент повышения расхода некондиционного агломерата, сопровождалась стабилизацией их работы по газодинамике верха. Увеличение интенсивности по дутью составило 0,24 % на каждый процент роста содержания окатышей в ЖРС (табл. 2).

На доменных печах № 9 и 10 установили, что загрузка некондиционного агломерата в количестве до 18 % от расхода железорудной части шихты совместно с агломератом повышенного качества фабрики № 5 позволяет

сохранить коэффициент сопротивления шихты движению газового потока в верхней части печи (табл. 2).

Таблица 2 – Показатели работы доменных печей № 6, 9 и 10 ПАО «ММК» в условиях компенсации расхода некондиционного агломерата увеличением доли окатышей и агломерата повышенного качества

Наименование показателей	Величины показателей при изменении содержания некондиционного агломерата в массе железорудной части шихты, %					
	-	5,6	3,1	13,7	-	18,0
Номер доменной печи	6		9		10	
Содержание окатышей в железорудной шихте, %	34,5	37,9	31,1	36,5	25,2	26,3
Содержание агломерата фабрики № 5 в железорудной шихте, %	-					18,0
Удельный расход кокса (сухого, скипового), кг/т чугуна	451,4	450,0	413,6	408,0	403,4	404,1
Производительность, т/сутки	3300	3307	5042	5042	5210	5232
Интенсивность хода по дутью, м ³ /м ³ минуту	1,895	1,903	1,880	1,918	2,105	2,083
Удельный расход природного газа, м ³ /т чугуна	121,2	115,9	107,6	109,0	129,5	132,2
Коэффициент сопротивления шихты движению газов в верхней части печи	0,21	0,14	0,70	0,61	0,20	0,20

Исследованием работы доменной печи № 4 в условиях ограничения интенсивности по дутью, включая природный газ, из-за приближения шихты вверху шахты к состоянию «подвисания», установили, что загрузка коксовой фракции в количестве 5 кг/т чугуна в смеси с некондиционным агломератом, доля которого в железорудной части составляла 6,7 %, частично компенсировала негативное влияние такого агломерата. В опытный период увеличение коэффициента сопротивления шихты составило 0,65 % на каждый процент роста доли некондиционного агломерата, что меньше на 0,33 % по сравнению с загрузкой его без коксовой фракции (табл. 3).

Для стабильной работы печи по газодинамике верха её шахты сохранением интенсивности по дутью целесообразно загружать некондиционный агломерат в смеси с коксовой фракцией в соотношении 2,5 кг/т чугуна на каждый процент роста доли некондиционного агломерата.

Таблица 3 – Показатели работы доменных печей № 4 и 10 ПАО «ММК» при совместной загрузке некондиционного агломерата с добавочными материалами

Наименование показателей	Величины показателей при изменении содержания некондиционного агломерата в массе железорудной части шихты, %					
	-	6,7	-	7,4	-	11,9
Номер доменной печи	4		6		10	
Расход, кг/т чугуна: коксовой фракции, марганцевой руды	- -	5,0 -	- 6,8	- 24,7	- 4,5	- 23,5
Удельный расход кокса (сухого, скипового), кг/т чугуна	425,6	420,5	434,7	448,4	422,6	417,8
Производительность, т/сутки	3785	3787	3435	3435	5303	5311
Интенсивность хода по дутью, м ³ /м ³ минуту	2,027	1,993	1,968	2,042	2,291	2,292
Коэффициент сопротивления шихты движению газов в верху шахты	0,30	0,30	0,14	0,15	0,25	0,25

Загрузка марганцевой руды в количестве 3,34 кг на 1 % некондиционного агломерата в доменную печь № 6, работающую в условиях ограничения интенсивности плавки по состоянию шихты в верху печи, компенсировало отрицательное влияние некондиционного агломерата на взаимное сопротивление потоков шихты и газа в шахте печи. Увеличение удельного расхода кокса составило 13,7 кг/т чугуна, что соответствует дополнительному развитию реакции прямого восстановления оксидов марганца.

Загрузка марганцевой руды в соотношении 1,98 кг/т чугуна на 1 % роста некондиционного агломерата в доменную печь № 10, работающую в условиях сдерживания интенсивности процесса производства чугуна его ходом вниз печи, обеспечило стабильный сход материалов в верхней части печи. Организация промывки коксовой насадки в горне печи за счет рационального использования марганцевой руды позволило эффективно удалить из горна избыточную спель и мелочь кокса, что обеспечило повышение производительности на 8 т/сутки при уменьшении удельного расхода кокса на 4,8 кг/т чугуна (табл. 3).

На доменной печи № 4 исследовали режимы загрузки некондиционного агломерата совместно с агломератом текущего производства и окатышами в локальные зоны по сечению колошника. Обеспечивали распределение некондиционного агломерата (% от его расхода) в кольцевых зонах колошникового пространства для различных вариантов его загрузки:

- в первый и второй рудные скипы матрицы – на периферии 24 %, в промежуточной зоне между периферией и зоной рудного гребня – 40 %, в зоне рудного гребня – 36 %;

- в первый рудный скип матрицы – на периферии 27 %, в промежуточной зоне – 28 %, в зоне рудного гребня – 45 %;

- во второй рудный скип матрицы – на периферии 8 %, в промежуточной зоне – 42 %, в зоне рудного гребня – 50 %.

Общая доля некондиционного агломерата в исследуемые периоды составляла 6,5-7,8 % от расхода железорудной части шихты.

Коксовую фракцию во всех исследуемых периодах загружали в первый и второй рудные скипы матрицы. В бункере БЗУ коксовая фракция располагалась в середине слоя железорудного сырья и над ним в верхней части. Такое размещение коксовой фракции обеспечивало следующее распределение ее по радиусу печи: на периферии 7 %, в промежуточной зоне между периферией и зоной рудного гребня 49 %, в зоне рудного гребня 44 % (табл. 4).

Таблица 4 – Распределение некондиционного агломерата по станциям углового положения лотка в исследуемые периоды

Номер периода	Режим загрузки некондиционного агломерата в рудные скипы матрицы	Доля некондиционного агломерата (%), поступающего со станции углового положения лотка						
		11	10	9	8	7	6	5
I	в 1-ый и 2-ой	4	20	20	19	17	13	7
II	в 1-й	5	22	15	13	17	17	11
III	во 2-й	1	7	16	25	21	17	12

В результате, поступление более 20 % некондиционного агломерата от его расхода в пристеночную зону колошника уменьшало негативное влияние железорудного сырья на истираемость футеровки. Увеличение доли некондиционного агломерата на периферии от 24 до 27 % снижало среднюю температуру холодильников шахты на 6,5 °С. Градиент температур периферийного и колошникового газа уменьшился на 50 °С, что сопровождалось увеличением коэффициента сопротивления шихты движению газового потока в верхней части печи на 4,3 %.

По сравнению с применением некондиционного агломерата по существующей в настоящее время технологии производительность печи уменьшилась от 3462 до 3449 т/сутки при сокращении удельного расхода кокса от 426,2 до 423,4 кг/т чугуна (табл. 5).

Загрузка некондиционного агломерата преимущественно в зону рудного гребня и промежуточную зону между периферией и рудным гребнем при уменьшении доли некондиционного агломерата на периферии от 27 % до 8 % обеспечивало эффективное перемешивание его с коксовой фракцией, что

сопровождалось снижением коэффициента сопротивления шихты движению газового потока в верхней части печи на 3,78 %.

Таблица 5 – Основные технико-экономические показатели работы доменной печи № 4

Наименование показателей	Номер периода		
	I	II	III
Содержание некондиционного агломерата в массе железорудной части шихты, %	6,5	7,8	7,3
Расход коксовой фракции, кг/т чугуна	19,9	17,3	17,1
Удельный расход кокса (сухого, скипового), кг/т чугуна	426,2	423,4	422,6
Производительность, т/сутки	3462	3449	3509
Интенсивность хода по дутью, м ³ /м ³ минуту	1,980	1,970	1,934
Коэффициент сопротивления шихты движению газов в верху шахты	5,32	5,55	5,34
Температура холодильников шахты, °С	58,1	51,6	49,6

Переход на режим увеличения доли некондиционного агломерата в зоне рудного гребня от 41 до 50 %, между рудным гребнем и периферией от 34 до 42%, при сокращении у периферии от 25 до 8% дал рост производительности печи на 53,5 т/сутки при уменьшении удельного расхода кокса на 3,3 кг/т чугуна.

Заключение

1. Проведением лабораторных испытаний установлены наиболее существенные физико-механические и физико-химические характеристики некондиционного агломерата. Его основные отличительные признаки по сравнению с агломератом текущего производства, вследствие атмосферного воздействия в течение одного месяца, следующие:

- увеличивалось содержание фракции 0-5 мм от 5,7 до 17,2 % при уменьшении эквивалентной по поверхности крупности от 12,3 до 7,4 мм;

- ухудшились прочностные показатели: уменьшалось сопротивление удару на 0,43 % отн. в холодном состоянии, на 3,72 % отн. после восстановления при температуре 500 °С;

- увеличивалась степень восстановления при температуре 500 °С от 3,8 до 4,3 %, что обеспечило более высокое содержание FeO, равное 19,4 %, против 17,8 % у агломерата текущего производства.

2. Физическим и математическим моделированием получены зависимости распределения некондиционного агломерата по крупности при движении со станций углового положения лотка в колошниковое пространство смеси его с кондиционным по крупности агломератом, окатышами и добавочными материалами для условий односкипового и двухскипового режимов наполнения бункера БЗУ лоткового типа. Созданы программы для ЭВМ, позволяющие

определить однородность железорудных материалов по фракционному составу при ссыпании их с лотка ЗУ в колошниковое пространство печи. Эти теоретические положения послужили основанием для разработки эффективных режимов распределения некондиционного агломерата по сечению колошника при загрузке.

3. При размещении некондиционного агломерата в нижней части бункера лоткового устройства с первой по ходу движения лотка станции поступает основная часть мелкой фракции агломерата. По истечении 50 % времени формирования порций от общей продолжительности выпуска содержание его не превышает 20 %. При размещении некондиционного агломерата в бункере БЗУ над крупной фракцией с первой по ходу движения лотка станции поступает незначительное количество мелкой фракции агломерата. Основная часть его приходится на середину выпуска компонентов шихты из бункера БЗУ в колошниковое пространство.

4. Разработан алгоритм выбора печи в доменном цехе для загрузки в нее некондиционного агломерата, на основе расчетного времени пребывания материалов в противоточной зоне и оценки силового взаимодействия потоков шихты и газа в верху шахты.

5. Промышленными испытаниями на доменных печах №№ 4, 6, 9 и 10 ПАО «ММК» дано технологическое обоснование эффективного использования некондиционного агломерата: разработаны, обоснованы и внедрены режимы его загрузки, обеспечивающие улучшение показателей их работы. Для стабильной работы печей по газодинамике верха необходимо на каждый процент повышения расхода некондиционного агломерата применять одно из компенсирующих мероприятий: увеличивать долю окатышей на 0,5 % от расхода ЖРС, повышать долю агломерата повышенного качества фабрики № 5 на 1 % от расхода ЖРС или загружать коксовую фракцию в количестве 2,5 кг/т чугуна.

6. Установлено влияние совместной загрузки некондиционного агломерата, с марганцевой рудой Ниязгуловского месторождения на показатели доменной плавки. Стабильную работу обеспечила загрузка этой руды в количестве 3,34 кг/т чугуна на 1 % роста доли такого агломерата в условиях угрозы «подвисания» шихты в верхней части шахты и 1,98 кг/т чугуна на 1 % некондиционного агломерата в условиях определяющей роли газодинамики в нижней части.

7. Разработаны эффективные режимы размещения некондиционного агломерата в колошниковом пространстве печи на основе загрузки его преимущественно в зону рудного гребня и промежуточное пространство между периферией и рудным гребнем в смеси с коксовой фракцией или агломератом повышенного качества аглофабрики № 5. Использование некондиционного агломерата направлением его во второй рудный скип матрицы с выгрузкой в колошниковое пространство печи с позиций углового положения лотка №№ 5-9, по сравнению с равномерным его распределением по радиусу колошника,

обеспечила увеличение производительности на 53,5 т/сутки при уменьшении удельного расхода кокса на 3,3 кг/т чугуна.

Основное содержание работы отражено в следующих публикациях:

В рекомендованных ВАК РФ изданиях:

1. Чевычелов, А.В. 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 (Е.О. Харченко), А.С. Харченко // Черные металлы. - 2012. - № 5. - С. 43-45.

2. Сибатуллин, С.К. 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 (Е.О. Харченко), А.В. Чевычелов, В.А. Бегинюк // Metallургические процессы и оборудование. - 2013. - № 4. - С. 55-61.

3. Сибатуллин, С.К. Рациональное размещение материалов в шихтовом бункере компактного бесконусного загрузочного устройства / С.К. Сибатуллин, А.С. Харченко, Е.О. Теплых (Е.О. Харченко), В.А. Бегинюк, М.А. Семенюк, Д.Н. Гушин // Metallургические процессы и оборудование. - 2014. - № 1. - С. 27-32.

4. Сибатуллин, С.К. Прочностные характеристики коксового орешка различного происхождения / С.К. Сибатуллин, А.С. Харченко, Е.О. Теплых (Е.О. Харченко) и др. // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. - 2012. - № 1. - С. 19-21.

5. Сибатуллин, С.К. 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.

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

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

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

Охранные документы:

1. Пат. 2700977 Российская Федерация, МПК C21B5/00. Способ загрузки доменной печи / А.С. Харченко, С.К. Сибатуллин, Е.О. Харченко и др; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» - № 2018147577; опубли. 24.09.2019 Бюл. № 27.

2. Пат. 2722846 Российская Федерация, МПК C21B5/00. Способ загрузки доменной печи / А.С. Харченко, С.К. Сибатуллин, Е.О. Харченко и др; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» - № 2020102327; опубли. 06.04.2020 Бюл. №16.

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. Сibaгатуллин, Е.О. 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. Сibaгатуллин, Е.О. 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. Сibaгатуллин, Е.О. Харченко 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. Сibaгатуллин, Е.О. Харченко и др.

В других изданиях:

1. Сibaгатуллин, С.К. Закономерности распределения мелкой фракции агломерата по ходу выпуска из бункера лоткового загрузочного устройства С.К. Сibaгатуллин, А.С. Харченко, Е.О. Харченко и др. // XVI международный конгресс сталеплавателей и производителей металлов. - Екатеринбург, 2021. - С. 357-363.

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

3. Сibaгатуллин, С.К. 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.

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

5. Сibaгатуллин, С.К. 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.

6. Сibaгатуллин, С.К. Повышение полноты использования кокса на доменных печах / С.К. Сibaгатуллин, В.Л. Терентьев, Е.О. Теплых (Е.О. Харченко) и др. // Наука и производство Урала. - Новотроицк: НФ МИСиС. - 2012. - № 8. - С. 13-17.

7. Харченко, А.С. 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 (Е.О. Харченко) 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. Теплых, Е.О. Влияние расположения окатышей в слое агломерата в бункере компактного БЗУ на равномерность их поступления в колошниковое пространство печи / Е.О. Теплых (Е.О. Харченко), 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.

9. Харченко, А.С. 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 (Е.О. Харченко) и др. // Современная металлургия начала нового тысячелетия: сб. 9-й научно-практической конференции. - Липецк: ФГБОУ ВПО «ЛГТУ», - 2012. - С. 39-44.

10. Сибатуллин, С.К. Влияние последовательности расположения агломерата по крупности в бункере БЗУ на однородность его поступления в колошниковое пространство печи / С.К. Сибатуллин, Е.О. Теплых (Е.О. Харченко), 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.

11. Сибатуллин, С.К. 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 //Литейные процессы. - 2016. - № 15. - С. 36-42.

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

13. 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 (Е.О. Харченко), А.С. Харченко // Теория и технология металлургического производства. - 2011. - № 11. - С. 12-16.