

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МАГНИТОГОРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Г.И. НОСОВА»

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

Диссертация
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Сибгатуллин Салават Камилович

Магнитогорск – 2021

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	4
Глава 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ПОСТАНОВКА ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ.....	10
1.1 Требования, предъявляемые к качеству железорудного сырья	10
1.2 Опыт использования мелких фракций агломерата в шихте доменных печей	13
1.3 Особенности загрузки шихтовых материалов лотковым загрузочным устройством	18
1.4 Оценка газодинамического состояния в верхней части доменной печи	22
Выводы по главе 1. Постановка цели и задач исследования.....	24
Глава 2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НЕКОНДИЦИОННОГО АГЛОМЕРАТА И СРАВНЕНИЕ ИХ С АГЛОМЕРАТОМ ТЕКУЩЕГО ПРОИЗВОДСТВА.....	26
2.1 Методика определения физико-механических свойств агломерата и восстановления его в среде водорода	27
2.1.1 Крупность	27
2.1.2 Холодная прочность	28
2.1.3 Горячая прочность.....	29
2.1.4 Плотность	30
2.1.5 Пористость	33
2.1.6 Порозность	34
2.1.7 Углы откоса и внешнего трения.....	34
2.1.8 Газопроницаемость.....	36
2.2 Результаты исследований	36
Выводы по главе 2.....	42
Глава 3 ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ЭФФЕКТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕКОНДИЦИОННОГО АГЛОМЕРАТА В ДОМЕННОМ ЦЕХЕ ПАО «ММК»..	43
3.1 Влияние расхода некондиционного агломерата на технико-экономические показатели работы доменных печей.....	43
3.1.1 Анализ работы доменных печей объемом 1370 м ³	43

3.1.2	Анализ работы доменной печи объемом 2014 м ³	49
3.2	Физическое и математическое моделирование режимов загрузки некондиционного агломерата применительно к доменным печам №№ 2, 4, 6, 9 и 10 ПАО «ММК»	54
3.3	Разработка алгоритма выбора печи в доменном цехе ПАО «ММК» для загрузки в нее некондиционного агломерата	64
	Выводы по главе 3	68
	Глава 4 РАЗРАБОТКА И ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ЗАГРУЗКИ НЕКОНДИЦИОННОГО АГЛОМЕРАТА В ДОМЕННЫЕ ПЕЧИ ПАО «ММК»	70
4.1	Загрузка некондиционного агломерата совместно с повышением доли окатышей	70
4.2	Совместная загрузка некондиционного агломерата с агломератом повышенного качества фабрики № 5	78
4.3	Компенсация негативного влияния некондиционного агломерата загрузкой добавочных материалов: коксовая фракция, марганцевая руда	85
4.4	Загрузка некондиционного агломерата совместно с агломератом текущего производства и окатышами в локальные зоны по сечению доменной печи № 4 ПАО «ММК»	94
	Выводы по главе 4	105
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	107
	Список используемой литературы	109
	Приложение А	125
	Приложение Б	126

ВВЕДЕНИЕ

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 объем промышленных выбросов CO₂ в 2018 г достиг 33,9 млрд. т [1-5]. Для этого важно снижение углеродного следа при производстве металла [6,7]. Промышленные предприятия Российской Федерации занимают четвертое место по выбросу диоксида углерода в атмосферу. Развитие чёрной металлургии России продолжается – с 2016 г объем инвестиций в него увеличивается и в 2020 г он составил около 300 млрд. руб [2,8,9]. 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 [10-19].

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 [20-31], состав, температура и интенсивность дутья, вдувание дополнительных компонентов [32,33].

Наиболее высокие технико-экономические показатели доменной плавки достигаются при применении качественных шихтовых материалах [34-38], 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 однитрактовым 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 однитрактовым 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 взаимосопротивлением 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 плавов 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 сталеплавателей 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.

Глава 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ПОСТАНОВКА ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ

1.1 Требования, предъявляемые к качеству железорудного сырья

В российских и зарубежных публикациях [38-45] изложены требования, предъявляемые к качеству железорудных материалов. Основное внимание уделяется химическому составу и его стабильности по ряду элементов, холодной и горячей прочности, крупности железорудного сырья [46-49]. Высокие показатели физико-механических и физико-химических свойств железорудного сырья должны обеспечивать выплавку заданного количества чугуна при минимальном выходе шлака, обладающего пониженной вязкостью, высокую газопроницаемость столба шихты в верхней части печи, хорошую жидкоподвижность в горне печи. Например, увеличение низкотемпературной прочности агломерата на 10 % снижает температуру колошникового газа на 100-120 °С и увеличивает степень использования газа на 2% [50]. В ПАО «ММК» росту степени использования газа на 1 % соответствует снижение удельного расхода кокса на 1,35 %, а улучшение горячей прочности агломерата на 2 % – экономии кокса в количестве: $[(2 \times 1,35) \times 429,2] : 100 = 10,08$ кг/т чугуна (где 429,2 – удельный расход кокса по доменному цеху, кг/т чугуна). Таким образом, на 1 % повышения горячей прочности агломерата приходится снижение удельного расхода кокса на 1,01 кг/т чугуна.

Для достижения высоких показателей плавки необходимо, чтобы материалы не разрушались в объеме шихты на расстоянии 3-6 м от поверхности засыпи. Институт черных металлов сформулировал современные требования к качеству железорудного сырья (см. табл. 1.1), которые включают комплекс показателей, в том числе показатели горячей прочности окатышей [50].

Согласно табл. 1.1. содержание мелкой фракции (0-5 мм) для агломерата не должно превышать 10 %. В процессе восстановления слоя агломерата под нагрузкой 0,1МПа по ГОСТ 21707-73 в температурном интервале активного их размягчения (850-1050 °С) спек должен обеспечивать величину перепада давления

газового потока не более чем 147 Па, при восстановлении не менее чем на 85%. Выход фракции >5 мм после восстановления окатышей по ГОСТ 19575-81 должен составлять не менее 50 %.

Таблица 1.1 – Современные требования к качеству железорудного сырья по разработке ИЧМ [50]

Показатель	Железорудный материал	
	агломерат	окатыши
Содержание в отгружаемой продукции материала с сопротивлением сжатию 2 кН/образец (ГОСТ 24765-81), не менее	–	90
Прочность на удар (выход фракции >5 мм) при испытании в стандартном барабане (ГОСТ 15137-77), не менее	80	95
Истираемость (выход фракции 0,5-5 мм) при испытании в стандартном барабане (ГОСТ 15137-77), не менее	4	3
Содержание мелочи 5-0 мм в отгружаемой продукции, не более	10	3
Крупность отгружаемой продукции, %, не менее	(8-35) 85	(8-12(8-16)) 95
Истираемость (выход фракции 0,5-0 мм) при восстановлении (ГОСТ 19575-81), % не более	5	5
Выход фракции >5 мм после восстановления (ГОСТ 19575-81), % (> 10 мм), не менее	50 (–)	80 (70)
Перепад давления газового потока при восстановлении слоя под нагрузкой (ГОСТ 21707-73), Па, не более	147	196
Допустимые колебания, не более:		
содержания железа, %	±0,25	±0,25
FeO, %	±1,0	–
Основности CaO/SiO ₂	±0,05	±0,025
Допустимое содержание щелочей, %, не более	0,15	0,15
Температура потери газопроницаемости слоя, °С	1260-1280	1230-1250
Температура начала фильтрации жидких фаз, °С, не менее	1380	1350/1380*
Температура максимальной фильтрации, °С	1500-1560	1500
Содержание FeO в первичном шлаке, %, не более	12	30/60*
Остаток шлака в слое кокса при 1600 °С, %, не более	18	8

* для неофлюсованных окатышей с содержанием SiO₂ < 5%.

На основе рациональных показателей физико-механических и физико-химических свойств агломерата и окатышей металлургические предприятия, использующие данные материалы в составе шихты доменных печей, разрабатывают стандарты предприятия, в которых указываются интервалы данных свойств соответствующих кондиционной продукции. В частности, для условий ПАО «ММК» разработан стандарт организации «Привозное железорудное сырье, аглоруда, концентрат и агломерат», согласно которому в произведенном агломерате контролируются следующие параметры:

- химический состав:
 - содержание в агломерате:
 - железа,
 - серы,
 - оксида магния,
 - закиси железа,
 - основности (CaO/SiO_2),
 - ровность в допустимые пределы отклонения:
 - по железу,
 - по основности (CaO/SiO_2),
 - по окиси магния,
- содержание в агломерате фракции 0-5 мм.

Допустимые величины указанных параметров устанавливаются в режимных картах работы агломерационных фабрик, локальных приказов и зависят от различных факторов, таких как состав шихты, производственные возможности агломерационных фабрик и так далее.

Агломерат, не соответствующий требованиям, заданным в стандарте организации, режимных картах и локальных приказов, относят к разряду – некондиционный. Причины его образования различны:

– складирование части агломерата в специализированных местах с целью обеспечения стабильной поставки сырья в доменную печь в период

запланированных или незапланированных остановок агломерационных фабрик, перебоев с поставкой окатышей;

– нарушение технологического процесса производства агломерата.

Среднегодовая доля некондиционного агломерата в агломерационном цехе составляет около 15 % от массы производимого агломерата.

Для обеспечения повышения полноты использования производимого на собственном предприятии агломерата, образующийся некондиционный агломерат используют в составе шихты доменных печей. Его доля от массы железорудного сырья на отдельных доменных печах может достигать до 30 %, что приводит к осложнению хода процесса получения чугуна и снижению технико-экономических показателей работы агрегата. В связи с этим необходимо разрабатывать рациональные режимы использования некондиционного агломерата для повышения технико-экономических показателей работы агрегатов.

1.2 Опыт использования мелких фракций агломерата в шихте доменных печей

Вопросами разработки рациональных режимов загрузки мелких фракций агломерата в доменные печи занимаются на многих металлургических предприятиях [51-57], в частности в Российской Федерации в ПАО «НЛМК» [52,53], ПАО «Северсталь» [54], АО «ЗСМК» [57].

В ПАО «НЛМК» разработана и внедрена технология совместной загрузки кокса мелких фракций 10-25 мм с агломератом фракций менее 5 мм [52]. На доменной печях №№ 3 и 6 полезным объемом соответственно 2000 и 3200 м³ в качестве мелкой фракции агломерата использовали класс (-5 мм), в доменную печь «Россиянка» полезным объемом 4290 м³ загружали агломерат фракции 4-5 мм. Технология осуществления заключалась в выделении мелких фракций агломерата и загрузкой их в количестве 20-100 кг/т чугуна в смеси с коксовым орешком (10-20 кг/т чугуна) отдельной порцией. При этом обеспечивалось

увеличение коэффициента замены кокса орешком на 0,1-0,15 кг/т чугуна и достигала 0,90 кг/кг. При этом необходимо отметить, что удельная производительность доменных печей составляла $2,5\text{т}/(\text{м}^3\cdot\text{сут})$.

Достижение положительного эффекта при загрузке материалов различной крупности обеспечивается за счет увеличения порозности шихты при совместной их загрузке по сравнению с послойной их укладкой [58-62], что способствует повышению газопроницаемости слоя шихтовых материалов и позволяет повысить предельные величины по расходу мелких фракций агломерата (рис. 1.1).

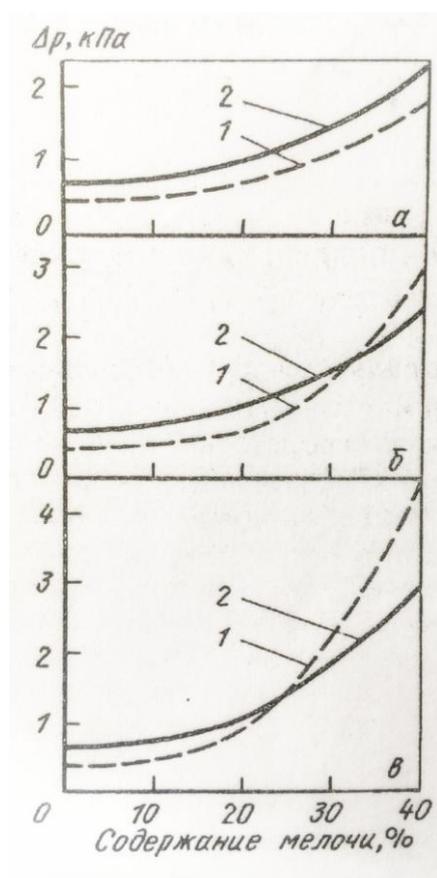


Рисунок 1.1, [63] – Влияние смешивания агломерата и кокса на газопроницаемость слоя для условий соотношения в мелкой фракции 0-2,5 и 2,5-5 мм: а – 0,3:0,7; б – 1:1; в – 0,7:0,3 (1 – послойная загрузка кокса и агломерата, 2 – загрузка смеси кокса и агломерата)

Согласно работе [63] на газопроницаемость смеси агломерата и кокса влияет соотношение фракций 0-2,5 мм и 2,5-5 мм. Смесь кокса с агломератом содержащем фракцию 0-5 мм 20 %, из которых класс 2,5-5 мм составляет 30 %,

обеспечивала большую газопроницаемость по сравнению с послойной укладкой указанных материалов (рис. 1.1). При дальнейшем увеличении доли мелких фракций в агломерате газопроницаемость смеси была ниже по сравнению с послойной загрузкой. Увеличение доли фракции 2,5-5 мм с 30 до 50 % сопровождалось увеличением критического содержания в шихте мелких фракций агломерата (0-5 мм) для смеси с 20 до 33 %. В условиях увеличения класса 2,5-5 мм до 70 % наибольшую газопроницаемость обеспечивала смесь кокса с агломератом содержащем фракцию 0-5 мм в интервале 0-40 %.

Исследования на доменной печи полезным объемом 2000 м³ в «Запорожсталь» показали, что в периодах ее работы с осуществлением смешивания железорудного сырья и кокса по сравнению с периодами, в которых использовали обычный режим загрузки, увеличилась производительность печи с 3711 до 3850 т/сутки при уменьшении удельного расхода кокса с 503 до 480 кг/т чугуна [63].

При совместной загрузке мелких фракций агломерата и кокса необходимо учитывать рациональное размещение кокса класса 10-25 мм в колошниковом пространстве печи. Наиболее эффективное его использование в технологии производства чугуна в доменной печи достигается размещением коксового орешка или коксовой фракции в зоне рудного гребня [64-68]. Размещение кокса мелких классов в низкотемпературной зоне по радиусу печи с высоким содержанием CO₂ будет способствовать ускоренному расходованию углерода по реакции Белла-Будуара, что предотвратит поступление его в горн печи и ухудшение дренажной способности коксовой насадки.

В ПАО «Северсталь» разработана и внедрена технология загрузки фракции (-6 мм) в количестве до 2 % от массы ЖРС в периферийную зону печи с целью обеспечения рационального распределения газового потока по радиусу колошника [54]. Поступление заданного количества мелкой фракции агломерата на периферию обеспечивали размещением необходимого количества мелкой фракции в головной части железорудной порции, массу которой рассчитывали по формуле [55]:

$$M = \frac{K \cdot M_{\Gamma} [100 - A(100 - R)]}{100}, \quad (1.1)$$

где K – эмпирический коэффициент, равный 0,1-0,25;

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

A – доля агломерата в железорудной части шихты, ед;

R – показатель прочности агломерата после восстановления по выходу фракции + 6,3 мм, %.

Применительно к лотковому загрузочному устройству массу мелких фракций, загружаемых в составе одной порции, определяли по формуле [69]:

$$M_{оЖРМ} = \frac{n_{кз} \cdot y_m \cdot q_m}{V_{л} K_{ИМ}}, \quad (1.2)$$

где $n_{кз}$ – заданное количество замкнутых оборотов лотка БЗУ, в которые выгружают мелкие фракции агломерата, т;

y_m – насыпная масса мелких фракций агломерата, т/м³;

q_m – объемный расход при выгрузке мелких фракций агломерата из бункера БЗУ, м³/с;

$V_{л}$ – частота вращения лотка, с⁻¹;

$K_{ИМ}$ – безразмерный коэффициент, учитывающий характер истечения мелких фракций агломерата, равный 0,25-0,5.

Проведением опытных плавок на доменной печи № 5 по реализации указанного режима загрузки мелких фракций агломерата установлено, что повышается степень использования газа за счет стабилизации температурно-теплового режима пристеночной зоны печи.

Ранее в начале XX века в АО «ЗСМК» была успешно опробована технология загрузки мелких фракций агломерата к стенке печи [57]. Технология сосредоточенной загрузки позволила сократить периферийный газовый поток и его температуру, вследствие чего повысить степень использования тепловой и

химической энергии газа. Степень использования газа увеличилась на 0,21-0,26 %. Удельный расход кокса снизился на 0,20-0,24 % при повышении производительности на 0,12-0,15 %.

Согласно исследованиям [51] увеличение содержания мелких фракций агломерата с 3 % до 10 % (рис. 1.2) сопровождался смещением зоны температуры 700 °С в область середины шахты в условиях ухудшения технико-экономических показателей работы печи.

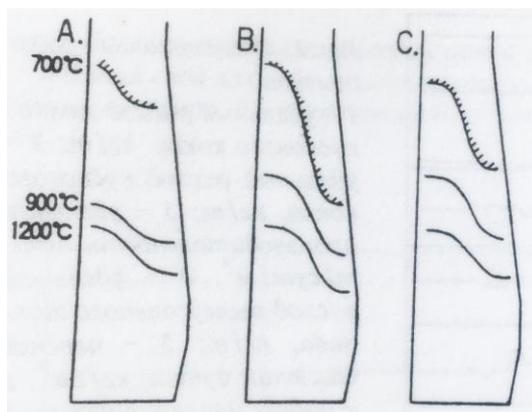


Рисунок 1.2, [51] – Результаты замера температуры по высоте шахты доменной печи № 3 Ниппон Кокан при использовании мелких фракций агломерата с их содержанием в ЖРС: А – 3 % (загрузка четырьмя подачами), В – 10 % (загрузка в подачи 1 и 3 из пяти в цикле), С – 12 % (загрузка пятью подачами)

Дальнейшее увеличение доли мелкого агломерата с 10 до 12 % со сменной режима загрузки обеспечило стабилизацию теплового состояния печи по радиусу печи при повышении производительности и снижении удельного расхода кокса.

Таким образом, в настоящее время существуют разработанные технологии использования мелких фракций агломерата в составе шихты доменных печей, заключающихся в преимущественной загрузке их в периферийную область колошника или совместной загрузке мелких фракций агломерата с коксовой фракцией или коксовым орешком, которые внедрены на крупных предприятиях РФ и зарубежья. Однако, успешность применения данных технологий зависит от ряда факторов, включающих, полезный объем печи, вид загрузочного устройства, режим загрузки, условия работы доменных печей, в том числе по показателям

качества железорудного сырья и кокса. В связи с чем, для условий работы каждой доменной печи необходимо разрабатывать уникальные режимы загрузки мелких фракций в колошниковое пространство печи для обеспечения стабильной ее работы с обеспечением синергетического эффекта с целью достижения увеличенных технико-экономических показателей.

1.3 Особенности загрузки шихтовых материалов лотковым загрузочным устройством

Распределение шихтовых материалов по гранулометрическому составу и виду по радиусу и окружности доменной печи определяют газопроницаемость слоя, образуемого этими материалами в шахте печи. В связи с чем, является важным фактором, который необходимо учитывать в период загрузки смеси кондиционного по крупности агломерата с некондиционным в доменную печь. Особенно это касается доменных печей, работающих с лотковым загрузочным устройством ввиду сложностей в обеспечении равномерности распределения материалов по окружности печи [70-86]. Согласно исследованиям [87-89] распределение материалов по радиусу колошника зависит от распределения состава материалов по высоте бункера БЗУ. В связи с этим, разработаны эмпирические зависимости (1.1 и 1.2) из которых следует, что для загрузки мелких фракций агломерата на периферию необходимо его размещать в головной части железорудной порции [55].

Для обеспечения равномерного распределения мелких фракций агломерата и коксового орешка необходимо обеспечивать их размещение в середине объема железорудного сырья, состоящего из агломерата и окатышей [90-93]. Согласно рисунку 1.3. при совместной загрузке в лабораторную установку агломерата фракций 1-5 мм, 5-10 мм и +10 мм наиболее равномерное распределение агломерата класса -5 мм по ходу выпуска обеспечивала его загрузка в смеси с агломератом фракции 5-10 мм в середине слоя агломерата +10 мм. Величина показателя равномерности выгрузки агломерата класса -5 мм составляла 0,80.

Равномерное распределение мелких и крупных фракций агломерата обеспечивало рациональное распределение эквивалентной по поверхности крупности агломерата в процессе выгрузки материалов на лоток (рис. 1.4).

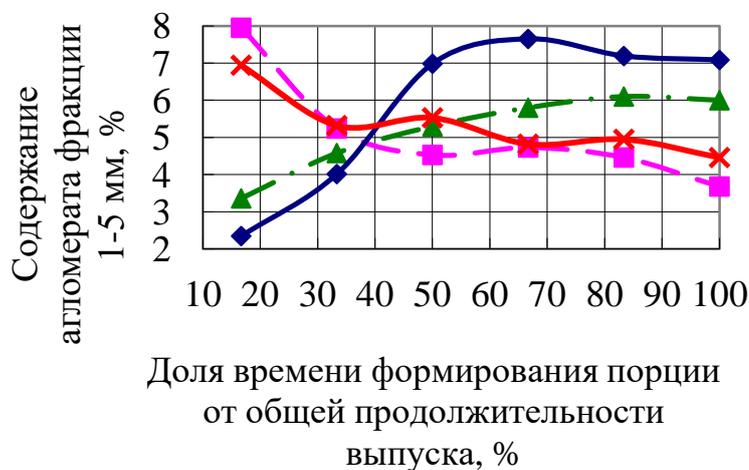


Рисунок 1.3, [90] – Содержание агломерата фракции -5 мм по мере истечения материала из бункера БЗУ при загрузке фракции -5 мм совместно с крупностью -10 мм в бункер под фракцию +10 мм (—■—), над ней (—◆—), в средний ее слой (—▲—) и расположении фракции +10 мм в слое агломерата крупностью -10 мм (—✕—)

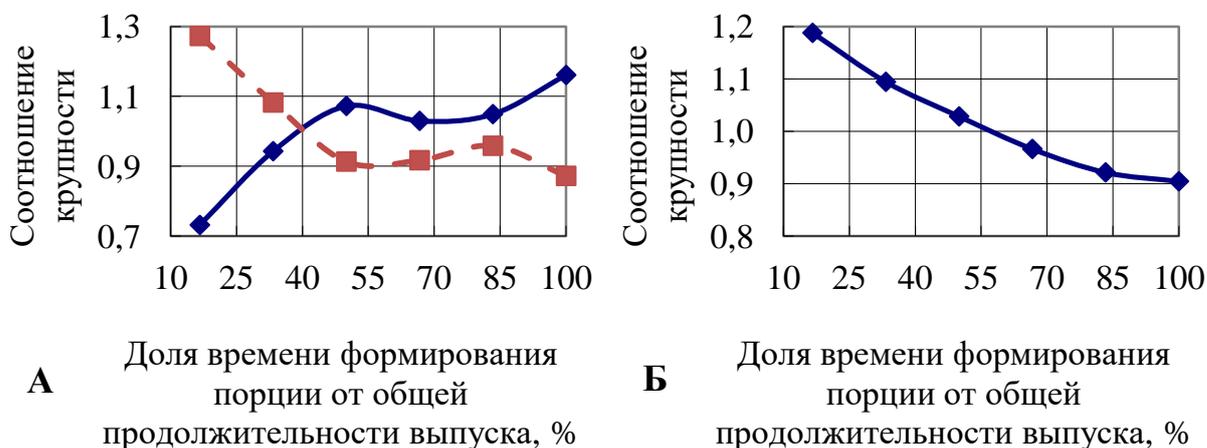


Рисунок. 1.4, [90] – Изменение отношения эквивалентной по поверхности крупности агломерата по мере истечения его из бункера БЗУ к исходной ее величине, при загрузке фракции -5 мм в бункере под фракцию +10 мм (—◆—, рисунок А), над ней (—■—, рисунок А), в средний ее слой (—◆—, рисунок Б) и расположении фракции +10 мм в слое агломерата крупностью -10 мм (—■—, рисунок Б)

Распределение мелких фракций агломерата по ходу выпуска от режимов загрузки можно описать уравнениями 1.3- 1.6 [91]:

$$A_{1-5}^n = 5,7 - 0,67 \cdot e^{\tau_{\text{фп}}} - \frac{0,05 \ln(\tau_{\text{фп}})}{\tau_{\text{фп}}^2}, \quad (1.3)$$

где A_{1-5}^n – содержание агломерата фракции 1-5 мм по ходу выпуска при загрузке его под фракцией +10 мм;

$\tau_{\text{фп}}$ – доля времени формирования порции от общей продолжительности выпуска, 0-1.

$$A_{1-5}^n = \tau_{\text{фп}}^{1,88} e^{-4,21-2,52 \cdot 10^{-2} \tau_{\text{фп}}}, \quad (1.4)$$

где A_{1-5}^n – содержание агломерата фракции 1-5 мм по ходу выпуска при загрузке его над фракцией +10 мм;

$\tau_{\text{фп}}$ – доля времени формирования порции от общей продолжительности выпуска, 0-100%.

$$A_{1-5}^c = 7,8 + 8,3 \tau_{\text{фп}}^2 \cdot \ln(\tau_{\text{фп}}) - \frac{0,689}{\tau_{\text{фп}}}, \quad R^2 = 0,98 \quad (1.5)$$

где A_{1-5}^c – содержание агломерата фракции 1-5 мм по ходу выпуска при загрузке его в середину слоя фракции +10 мм;

$$A_{1-5}^c = 7,8 + 8,3 \tau_{\text{фп}}^2 \cdot \ln(\tau_{\text{фп}}) - \frac{0,689}{\tau_{\text{фп}}}, \quad R^2 = 0,98 \quad (1.6)$$

где A_{1-5}^c – содержание агломерата фракции 1-5 мм по ходу выпуска при загрузке его в середину слоя фракции +10 мм;

$\tau_{\text{фп}}$ – доля времени формирования порции от общей продолжительности выпуска, 0-1.

При выгрузке материалов из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи необходимо учитывать траекторию движения шихты [94-100], в связи с чем,

задавать рациональные углы распределительного лотка [94], сегрегацию материалов на поверхности шихты [101,102] и ее перкаляцию [103].

Согласно исследованиям, описанным в работе [104], частицы агломерата крупностью 2-3 мм не выносятся газами из печи в пылеуловитель, а остаются на поверхности засыпи, переходя в псевдоожиженный слой. Затем мелкие фракции перетекают из плотных слоев железорудного материала в центральную зону печи с минимальными рудными нагрузками, также может наблюдаться перераспределение в область с меньшим газовым напором, что усиливает неравномерное распределение газового потока по радиусу и окружности колошника доменных печей, оснащенных бесконусным загрузочным устройством лоткового типа [105]. Это сопровождается ухудшением газопроницаемости столба шихты и снижением технико-экономических показателей работы печей. Особенно негативный эффект будет проявляться на печах с компактным лотковым устройством.

Как было указано в главе 1.2 для достижения положительного эффекта при загрузке мелких фракций агломерата необходимо обеспечивать рациональную порозность загружаемой шихты, для определения которых существует ряд формул [20,25]. Например, Тарасов В.П. [105] для определения порозности (ε_c) предлагает использовать следующую зависимость:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{\max} - m \cdot \text{arcctg}(1,83 + 1,22[(\frac{d_\Gamma}{d_K}) - 0,07]), \quad (1.7)$$

где ε_{\max} – максимальная порозность только для крупных (d_K) или только для мелких (d_Γ) кусков узкой фракции, м³/м³;

m – коэффициент, равный $< 0,5$.

При известной объемной доли мелочи для определения порозности шихты можно использовать следующую формулу [105]:

$$\varepsilon_c = 0,176 \lg(\frac{d_\Gamma / d_K}{14,4 \cdot 10^{-4}} - 0,07), \quad (1.8)$$

Использование разработанных зависимостей по определению порозности шихты не гарантирует обеспечения равенства ее величины в локальных зонах доменной печи по окружности и радиусу колошника. В связи с этим, необходимо выявлять рациональные режимы загрузки шихтовых материалов для достижения заданной порозности шихты, в локальных зонах колошникового пространства. При этом рациональные режимы загрузки железорудных материалов, в том числе мелких классов агломерата, по радиусу и окружности колошника зависят от различных факторов: состав железорудного сырья, добавочных материалов, масса материала, выгружаемого на колошник, матрица загрузки, вид загрузочного устройства, условия работы доменных печей по газодинамике. Для условий ПАО «ММК» необходимо учитывать фактор применения на доменных печах компактного бесконусного загрузочного устройства, в котором закономерности истечения компонентов шихты могут отличаться в сторону затруднения обеспечения равномерного распределения мелких фракций агломерата и добавочных материалов в смеси с которыми будет осуществляться их загрузка.

1.4 Оценка газодинамического состояния в верхней части доменной печи

Использование мелких фракций агломерата ограничивается газодинамической напряженностью в верхней части печи [25,27,106-109]. Расход мелких фракций осложняет работу печи по газодинамике в верхней части печи и может приводить к подвисяниям шихты. В связи с чем, очевидно, что при выборе доменных печей для загрузки мелочи агломерата необходимо оценивать расположение определяющей зоны по газодинамике и преимущественно использовать мелкие фракции агломерата на печах, где газодинамика верхней зоны печи не лимитирует процесс выплавки чугуна в доменной печи.

Для оценки газопроницаемости зернистых материалов можно использовать формулы Дарси-Вейсбаха, Рамзина Л.К. по расчету потерь напора (h) в слое шихты [20,27,108]:

$$h = \frac{\lambda_{\text{Re}} \cdot \omega^2 \cdot \rho \cdot H}{2g \cdot d \cdot \varepsilon^2} \quad (1.11)$$

где λ_{Re} – коэффициент сопротивления, являющейся функцией критерия подобия (числа Рейнольдса);

ω – приведенная к пустой шахте скорость движения газа, равная общему расходу газа в единицу времени, деленному на общее сечение слоя, м/с;

ρ – плотность газа кг/м³;

H – высота слоя, м;

g – ускорение силы тяжести, м/с²;

ε – порозность (относительный объем пустот) слоя шихты, м³/м³;

d – характерный линейный размер газового потока, м.

$$h = a \cdot \omega^m \quad (1.12)$$

где a – коэффициент, учитывающий все действующие факторы, кроме скорости газа;

m – показатель, учитывающий режим движения газового потока (для верхней части печи $m=1,9$).

$$h = \lambda_{\text{общ}} \cdot h_{\text{д}} \quad (1.13)$$

где $\lambda_{\text{общ}}$ – общий коэффициент сопротивления шихты;

$h_{\text{д}}$ – динамический напор газа.

Коэффициент сопротивления шихты можно определить по формуле Стефановича М.А. [108]:

$$\lambda_{\text{общ}} = \frac{P_{\text{д}}^2 - P_{\text{кг}}^2}{V_{\text{д}}^m} \quad (1.14)$$

где $P_{\text{д}}$ – давление горячего дутья, кПа;

$P_{\text{кг}}$ – давление колошниковога газа, кПа;

$V_{\text{д}}$ – расход холодного дутья на 1 м³ полезного объема печи, м³/ч;

Оценить взаимное сопротивление потоков шихты и газа в верхней части печи ($\lambda_{шг}$) можно опираясь на преобразованную формулу Стефановича М.А. [108-110]:

$$\lambda_{шг} = \frac{(2 \cdot P_{кз} + \Delta P_g) \cdot \Delta P_g}{V_o^{m_{верх}}}, \quad (1.15)$$

где $P_{сш}$ – давление газа в середине шахты, кПа.

Формулы 1.11-1.12 позволяют объяснить сущность процессов газодинамики, протекающих при движении газового потока через слой шихты. Так потери напора будут выше и, следовательно, наиболее интенсивное сопротивление шихты движению проходящего через нее газа будет в условиях меньшей порозности шихты или характерного линейного размера газового потока. При этом на практике при загрузке шихтовых материалов в доменную печь компактным лотковым загрузочным устройством возникают неоднородные по крупности слои шихтовых материалов, имеющие различную порозность и интенсивность газового потока. В связи с этим применение зависимостей 1.13 и 1.15 наиболее приближены к реальным условиям работы доменных печей, поскольку опираются на параметры действующих агрегатов, таких как интенсивность по дутью, перепады давления газа. В то же время, оценка взаимного сопротивления потоков шихты и газа в различных периодах в условиях анализа одной доменной печи обеспечивает стабильные и достоверные результаты о состоянии газодинамики агрегата, что нельзя сказать для условий сравнения различных агрегатов. Причиной может быть различная калибровка датчиков на доменных печах. В связи с чем, целесообразно разработать алгоритм выбора печи в доменном цехе для загрузки в нее некондиционного агломерата.

Выводы по главе 1. Постановка цели и задач исследования

Проведенный литературно-патентный обзор по использованию в доменном производстве некондиционного агломерата, показал целесообразность

дальнейшего совершенствования режима использования некондиционного агломерата на доменных печах, оснащённых однотоковым компактным БЗУ лоткового типа, по следующим причинам:

- определение рациональной порозности железорудной части шихты не гарантирует обеспечения равенства ее величины в локальных зонах доменной печи по окружности и радиусу колошника в условиях использования некондиционного агломерата;

- индивидуальные условия режимов загрузки и работы доменных печей: состав железорудного сырья, добавочных материалов, масса материала, выгружаемого на колошник, матрица загрузки, вид загрузочного устройства, условия работы доменных печей по газодинамике.

Целью данной работы является разработка эффективного режима использования некондиционного агломерата в доменных печах, оснащённых однотоковым компактным БЗУ лоткового типа, для повышения их производительности и снижения удельного расхода кокса.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие 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.

Глава 2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НЕКОНДИЦИОННОГО АГЛОМЕРАТА И СРАВНЕНИЕ ИХ С АГЛОМЕРАТОМ ТЕКУЩЕГО ПРОИЗВОДСТВА

Для проведения исследований в лаборатории ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» по определению физико-механических свойств агломерата были отобраны пробы с фабрик № 2, 3 и 5 ПАО «ММК». Химический состав исследуемых агломератов приведен в табл. 2.1.

Таблица 2.1 – Химический состав исследуемых агломератов фабрик ПАО «ММК»

Номер фабрики	Fe	FeO	S	SiO ₂	CaO	Oсн	MgO	Al ₂ O ₃	TiO ₂	P	Zn	Cr	MnO
2	55,7	10,4	0,061	5,83	11,24	1,93	1,95	1,69	0,22	0,026	0,029	0,021	0,25
3	55,5	10,1	0,071	6,28	11,32	1,8	1,83	1,66	0,19	0,026	0,039	0,018	0,24
5	58,2	11,1	0,039	5,31	9,17	1,73	1,55	1,53	0,25	0,02	0,014	0,009	0,17

Согласно табл. 2.1. агломерат фабрик 2 и 3 имел пониженное содержание общего железа и его закиси при увеличенной основности по CaO/SiO₂ по сравнению с агломератом фабрики № 5.

Определили физико-механические свойства агломерата по фракциям 0-5; 5-10 и 10-25 мм:

- плотность (насыпную, среднюю и истинную);
- пористость (открытую и общую);
- порозность,
- угол естественного откоса,
- внутренний и наружный углы откоса при поступлении материала на горизонтальную поверхность по наклонной стальной поверхности, расположенной под углами к вертикали 50, 30 град;
- угол внешнего трения о стальную поверхность;

- прочностные свойства агломерата в холодном состоянии и после восстановления при температуре 500°C.

Оценили ситовый состав и газопроницаемость агломератов различных фабрик.

Затем агломерат превратили в некондиционный путем складирования его в помещении сроком на один месяц с последующим пересыпанием, после чего вновь оценили изменение ситового состава и физико-механических свойств агломерата.

2.1 Методика определения физико-механических свойств агломерата и восстановления его в среде водорода

2.1.1 Крупность

Крупность сыпучих материалов, имеющих разный размер частиц, характеризуется гранулометрическим составом и средней величиной.

Гранулометрический состав агломератов определяли ситовым методом в соответствии с ГОСТ 27562-87. Затем рассчитывали средневзвешенную и эквивалентную по поверхности крупности.

Средневзвешенную крупность определяли по формуле:

$$f_{\text{срв}} = (a_1f_1 + a_2f_2 + a_3f_3 + \dots + a_nf_n) / 100, \quad (2.1)$$

где a_1, a_2, a_3 – массовая доля отдельных фракций, %;

f_1, f_2, f_3 – среднеарифметическая крупность соответствующих фракций.

Установленную таким образом величину использовали для оценки влияния крупности на ход процессов восстановления и теплообмена.

Эквивалентную по поверхности крупность определяли по формуле:

$$f_{\text{экрв}} = 100 / (a_1/f_1 + a_2/f_2 + a_3/f_3 + \dots + a_n/f_n). \quad (2.2)$$

Установленную таким образом среднюю величину использовали при оценке влияния крупности на газопроницаемость материала.

2.1.2 Холодная прочность

Прочность годного агломерата оценивали по сопротивлению его ударным и истирающим нагрузкам, которым подвергалась испытываемая проба во вращающейся в вертикальной плоскости со скоростью 27 об/мин в течение 8 минут стальной гладкостенной трубе длиной 1000 мм и диаметром в свету 78,5 мм. На испытание в трубу загружали 200 г годного агломерата фракции 10-15 мм. По завершении испытания извлекали пробу агломерата из трубы и взвешивали.

Прочность годного агломерата характеризовали сопротивлением удару (СУ), разрушением (Р) и истиранием (И). С целью их определения испытанную пробу агломерата последовательно рассеивали на решетке с ячейками диаметром 5 мм и сите с ячейками 0,5х0,5 мм, добиваясь полного отсева подрешетного продукта, то есть класса 0-5мм и фракции 0-0,5 мм, обращая особое внимание на полный отсев фракции 0-0,5мм, как трудно отсеваемой.

Процентное содержание в испытанной пробе агломерата классов +5мм, 0,5-5 мм и 0-0,5 мм характеризовало, соответственно, сопротивление агломерата удару, его разрушение и истирание. Полученные таким образом значения прочности близки к величинам, определяемым в соответствии с ГОСТ 15137-77.

Расчетное уравнение для определения этих характеристик:

$$[СУ, Р, И] = \frac{[M(5), M(0,5 - 5), M(0 - 0,5)]}{МП} \cdot 100\% \quad (2.3)$$

где СУ, Р, И – соответственно, сопротивление агломерата удару, его разрушение и истирание, %;

$M(5)$, $M(0,5-5)$, $M(0-0,5)$ – соответственно, масса в испытанной пробе агломерата классов +5, 0,5-5, 0-0,5мм, г;

МП – общая масса испытанной пробы, полученной как сумма масс в испытанной пробе агломерата классов +5, 0,5-5, 0-0,5мм, г.

Основными, определяющими характеристиками прочности агломерата, являются сопротивление его удару и истиранию; показатель разрушаемости является дополнительным.

2.1.3 Горячая прочность

«Горячая» прочность агломерата, или прочность после восстановления, оценивали путем нагрева материала в восстановительной среде в трубчатой печи с последующим охлаждением и барабанным испытанием на прочность (по п. холодная прочность агломерата). Для этого в лабораторную электрическую трубчатую печь загружали навеску агломерата класса крупности 10-15 мм массой $200 \pm 0,5$ г. Температуры изотермической выдержки агломерата в печи в потоке восстановительного газа составляла 500°C , продолжительность выдержки – 1 час в обоих случаях. В качестве восстановительного газа использовали водород (99,998%), во время нагрева и охлаждения пробы в печи водород заменяли на инертный газ – азот (99,5%). Во время испытаний расход восстановительного газа поддерживали на уровне 20 л/ч, расход инертного газа – на уровне 60 л/ч. После завершения испытаний пробу агломерата охлаждали в печи до температуры 100°C , взвешивали и направляли на определение прочности.

Абсолютную степень восстановления $R_{\text{абс}}$, отнесенную к максимальной степени окисленности железа в руде, вычисляли двумя способами:

- по химическому составу восстановленной пробы по формуле:

$$R_{\text{абс}} = \frac{0,111\text{FeO} + 0,430\text{Fe}_{\text{мет}}}{0,430\text{Fe}_{\text{общ}}} \cdot 100, \quad (2.4)$$

где FeO , $\text{Fe}_{\text{мет}}$, $\text{Fe}_{\text{общ}}$ – содержание монооксида железа, металлического железа и общего железа в восстановленной пробе, %;

0,111 – коэффициент пересчета потери кислорода при восстановлении Fe_2O_3 до FeO ;

0,430 – коэффициент пересчета $\text{Fe}_{\text{общ}}$ в пробе на эквивалентное количество кислорода, необходимое для окисления $\text{Fe}_{\text{общ}}$ в Fe_2O_3 .

- по потере массы пробы при восстановлении:

$$R_{\text{абс}} = \left(\frac{0,111\text{FeO}' + 0,430\text{Fe}_{\text{мет}}'}{0,430\text{Fe}_{\text{общ}}'} + \frac{(m' - m) \cdot 100}{m' \cdot 0,430 \cdot \text{Fe}_{\text{общ}}'} \right) \cdot 100, \quad (2.5)$$

где FeO' , $\text{Fe}_{\text{мет}}'$, $\text{Fe}_{\text{общ}}'$ – содержание монооксида железа, металлического железа и общего железа в исходной пробе, %;

m' – масса исходной пробы, г;

m – масса восстановленной пробы, г.

2.1.4 Плотность

Исследовали следующие показатели плотности в соответствии с ГОСТ 25732-88:

- насыпная;
- средняя (кажущаяся);
- истинная.

Насыпная плотность

Насыпная плотность показывает массу материала в единице объема, который в этом случае включает объем материала в сосуде вместе с пустотами внутри кусков и между ними. Этот показатель имеет значение для определения количества материала по массе в различных емкостях: в скипе, в бункерах бункерной эстакады, в межконусном пространстве или в шихтовом бункере загрузочного устройства, в горне доменной печи или во всей печи и т.д.

Сущность метода определения насыпной плотности заключается в определении объема материала в мерном сосуде и вычислении отношения его массы к объему, включая объем пустот внутри кусков и между ними.

Насыпную плотность определяли в воздушно-сухом состоянии пробы. Для определения насыпной плотности агломерата использовали сосуд вместимостью 50 дм³ диаметром 400 мм и высотой 400 мм. В предварительно взвешенный мерный сосуд засыпали пробу с высоты не более 50 мм над ее поверхностью до образования конуса над верхним краем сосуда. Затем избыточную часть материала снимали металлической пластиной так, чтобы плоскость поверхности пробы совпадала с верхним краем мерного сосуда. После этого сосуд с пробой взвешивали с погрешностью не более 0,05 кг.

Насыпную плотность $\rho_{\text{нас}}$, кг/м³, вычисляли по формуле:

$$\rho_{\text{нас}} = (m_2 - m_1) / V, \quad (2.6)$$

где m_1 – масса пустого сосуда;

m_2 – масса сосуда с материалом, кг;

V – вместимость сосуда, м³.

Средняя (кажущаяся) плотность

Средняя плотность материала представляет собой отношение массы отдельных кусков к их объему, включая объем внутренних пор (исключая межкусковые пустоты). Имеет значение для определения порозности и пористости материала.

Сущность метода состоит в вычислении отношения массы вещества агломерата к его объему, включая объем внутренних пор, определяемому гидростатическим взвешиванием. Имеются особенности методики в зависимости от вида материала.

Для вычисления средней плотности агломератов, крупнопористых и распадающихся в воде руд использовали следующую методику. Подготовленные пробы агломерата массой $m_a = (1000 \pm 10)$ г погружали отдельными кусочками на 1-2 с в расплавленный при температуре 60-65 °С парафин. После такого покрытия поверхности частиц парафином пробу помещали в корзину и взвешивали на воздухе, а затем опускали в сосуд с водой и через 5 мин взвешивали в воде. Извлекали корзину с пробой из воды и через 2 мин взвешивали на воздухе.

Определяли объем вещества пробы агломерата ($V_{\text{ап}}$) совместно с объемом пор и объемом парафина на поверхности частиц в см³:

$$V_{\text{ап}} = (m_{\text{ап1}} - m_{\text{а2}}) / 0,998, \quad (2.7)$$

где $m_{\text{ап1}}$ – масса парафинированной пробы агломерата, извлеченной из воды и взвешенной на воздухе, г;

$m_{\text{а2}}$ – результат взвешивания парафинированной пробы в воде, г.

Определяли объем парафина на поверхности частиц агломерата ($V_{\text{па}}$), см³:

$$V_{\text{па}} = (m_{\text{ап}} - m_a) / 0,90, \quad (2.8)$$

где $m_{\text{ап}}$ – масса парафинированной пробы агломерата на воздухе, г;

m_a – масса пробы агломерата без парафина, г;

0,90 – плотность парафина, г/см³.

Вычисляли объем вещества агломерата (V_a) совместно с объемом пор внутри частиц, см³:

$$V_a = V_{ап} - V_{па}, \quad (2.9)$$

Вычисляли среднюю плотность агломерата (ρ_a), г/см³:

$$\rho_a = m_a / V_a. \quad (2.10)$$

Истинная плотность

Истинной плотностью называется масса твердой фазы материала в единице его объема (исключая пустоты внутри кусков и между ними). Имеет значение для определения пористости.

Истинную плотность устанавливали отнесением массы вещества к его объему (объем пробы вещества определяли, исключая объем пор). Для этого использовали пикнометры вместимостью 50-70 см³.

Для измерения объема пробы использовали жидкость. Поскольку агломерат является гидрофильным, в соответствии с ГОСТ 25732-88 применяли дистиллированную воду.

Измерение начинали с определения вместимости пикнометра до метки. Для этого взвесили пустой пикнометр, наполнили его дистиллированной водой до уровня на 2-3 мм ниже метки, выдержали 30 мин в термостате при температуре (20±0,1 °С), довели нижний край мениска воды до метки, доливая ее при необходимости. Извлекли пикнометр из термостата и взвесили.

Вместимость пикнометра V , см³ вычисляли по следующей зависимости:

$$V = (m_{пв} - m_{п}) / 0,998, \quad (2.11)$$

где $m_{пв}$ – масса пикнометра после заполнения водой до метки, г;

$m_{п}$ – масса пустого пикнометра, г.

Далее определяли объем пробы, выделенной для испытания, массой (14±1) г, крупностью менее 0,16 мм после сушки в сушильном шкафу. Для этого помещали пробу в пикнометр, взвешивали его, заполняли до 1/3

дистиллированной водой и выдерживали 30 мин в вакуум-эксикаторе при давлении 532 Па для удаления воздуха из пустот в пробе. Доливали пикнометр водой до уровня на 2-3 мм ниже метки, выдерживали 30 мин в термостате при температуре $(20 \pm 0,1)$ °С, довели нижний край мениска жидкости до метки, доливая ее при необходимости, и взвесили.

Провели необходимые вычисления.

Объем жидкости в пустом пикнометре, см³:

$$V_{ж} = (m_{пж} - m_{п}) / \rho_{ж}, \quad (2.12)$$

где $m_{пж}$ – масса пикнометра после заполнения жидкостью до метки, г;

$m_{пп}$ – масса пустого пикнометра, г.

Объем жидкости в пикнометре с пробой, см³:

$$V_{жп} = (m_{пжп} - m_{пп}) / \rho_{ж},$$

где $m_{пжп}$ – масса пикнометра с пробой и жидкостью до метки, г;

$m_{пп}$ – масса пикнометра с пробой без жидкости, г.

Объем вещества пробы вычисляли по следующей зависимости, см³:

$$V_{п} = V_{ж} - V_{жп} \quad (2.13)$$

Истинную плотность испытываемого материала вычисляли по следующей зависимости, г/см³:

$$\rho_{ист} = (m_{пжп} - m_{п}) / V_{п}. \quad (2.14)$$

2.1.5 Пористость

Пористость характеризует объем пустот внутри кусков по отношению к их общему объему. Имеет значение для хода процессов тепло- и массообмена, в том числе для восстановления железа и других элементов из оксидов. Повышение пористости создает более благоприятные условия для протекания этих процессов. Выражается в долях от единицы или процентах. Исследовали общую пористость, которую вычисляли по результатам определения средней и истинной плотности в соответствии с ГОСТ 25732-88. При этом формулы для расчета характеризуют

отношение объема жидкости во всех порах к объему вещества пробы агломерата, включая поры внутри частиц.

Общую пористость агломерата рассчитали по формуле:

$$(\Pi_a)_{об} = ((\rho_{ист})_a - \rho_a) / (\rho_{ист})_a. \quad (2.15)$$

2.1.6 Порозность

Для движения газов и продуктов плавки по межкусковым пустотам большое значение имеет порозность материалов. Она характеризует объем межкусковых пустот по отношению к общему объему сыпучего материала. Выражается в долях единицы ε , $\text{м}^3/\text{м}^3$, или в процентах. Порозность максимальна для одинаковых по размеру кусков и минимальна в смеси двух фракций в том случае, если эти фракции различаются по размерам очень сильно – в этом случае мелкая фракция более полно заполняет пустоты между крупными кусками, чем в случае мало отличающихся по размерам кусков.

Порозность вычисляли по насыпной ($\rho_{нас}$) и средней ($\rho_{ср}$) плотностям:

$$\varepsilon = 1 - \rho_{нас} / \rho_{ср}. \quad (2.16)$$

2.1.7 Углы откоса и внешнего трения

На доменных печах величина угла откоса имеет особое значение в связи с влиянием на распределение железорудного сырья и кокса относительно друг друга, крупной и мелкой фракций, агломерата, окатышей и других материалов по сечению.

Угол естественного откоса агломерата

Угол естественного откоса сыпучих материалов измеряют по обрушению или по насыпанию. Различие углов естественного откоса по обрушению и насыпанию для компонентов доменной шихты допустимо не учитывать. Для целей настоящего исследования измеряли угол естественного откоса по обрушению.

На круглую подставку, в центре которой вертикально установлена закрепленная линейка, устанавливали металлический полый цилиндр, в который медленно засыпали агломерат, и медленно поднимали его до полного освобождения от материала.

По показанию линейки устанавливали высоту расположения вершины h . Вычисляли величину угла откоса по выражению:

$$\alpha = \arctg(h/R), \quad (2.17)$$

где R – радиус образующейся кучи материала.

Эта величина характеризует угол естественного откоса по обрушению.

Углы откоса агломерата в рабочих условиях и угол внешнего трения

Определяли наружный и внутренний углы откоса агломерата при падении с высоты 0,5 метра после движения по наклонной поверхности стального листа при углах наклона стального листа к вертикали 50° , 30° и длине поверхности 1 м. Угол наклона лотка, равный 50° , обеспечивает ссыпание агломерата в периферийную зону колошника. Угол наклона лотка, равный 30° , обеспечивает ссыпание агломерата в зону рудного гребня. При формировании угла откоса после отрыва материала от наклонной поверхности угол, образующийся по направлению движения агломерата характеризовал наружный угол откоса, а противоположный угол – внутренний.

Подъемом горизонтально расположенной поверхности стального листа с помещенным на нее слоем агломерата устанавливали угол внешнего трения агломерата о стальную поверхность как максимальный угол, при котором сохраняется неподвижное состояние материала. Для каждого определения производили не менее 5 параллельных испытаний, результаты подвергались статистической обработке и усреднялись.

2.1.8 Газопроницаемость

Для определения газопроницаемости использовали установку, включающую цилиндрическую емкость объемом 10 дм³, заполняемую агломератом, через которую воздуходувкой снизу вверх продували с различной скоростью воздух. Перепад давления в слое определялся при помощи жидкостного тягонапорамера. Слой агломерата выравнивали и измеряли его высоту, после чего приступали к определению. Включали воздуходувку, и изменяя подаваемую на нее мощность меняли скорость потока воздуха, просасываемого через слой агломерата, которая измерялась по перепаду давления на измерительной шайбе, расположенной по ходу движения воздуха между воздуходувкой и емкостью с агломератом. Измерения производились в пяти повторениях, результаты подвергались статистической обработке и усреднялись.

Потери напора, мм.вод.ст./м слоя агломерата, при заданной скорости газового потока рассчитывали по формуле:

$$h = H/l, \quad (2.18)$$

где H – потери напора в слое высотой l , мм.вод.ст;

l – высота слоя агломерата, м.

2.2 Результаты исследований

Результаты исследований представлены в таблицах 2.2-2.10. Агломерат фракций 0-5 мм имеет увеличенную общую пористость на 15 % и меньшую порозность на 16 % по сравнению с агломератом класса 10-25 мм (табл. 2.2).

Из сравнений таблиц 2.2 и 2.3 следует, что агломерат, который превратили в некондиционный путем складирования его в помещении МГТУ им. Носова сроком на один месяц по сравнению с агломератом текущего производства имеет уменьшенную эквивалентную по поверхности крупность на 39,82 % за счет увеличения в нем фракции 0-5 мм от 5,7 до 17,2 %, уменьшения класса +25 мм от

30,1 до 9,8 %. Однородность по крупности некондиционного агломерата уменьшилась по сравнению с кондиционным агломератом на 5,4 %.

Таблица 2.2 – Физико-механические свойства агломерата по фракциям

Наименование показателей	Содержание (%) по классам крупности (мм)			
	25-10	10-5	5-0	
Внутренний угол откоса (град) при поступлении материала на горизонтальную поверхность по наклонной стальной поверхности, расположенной под углом к вертикали, град:				
	50 (периферия)	33,2	36,6	30,8
30 (зона рудного гребня)	34,4	37,5	32,5	
Наружный угол откоса (град) при поступлении материала на горизонтальную поверхность по наклонной стальной поверхности, расположенной под углом к вертикали, град:				
	50 (периферия)	25,7	27,3	20,6
30 (зона рудного гребня)	26,3	31,4	25,1	
Угол естественного откоса, град	34,9	37,8	32,7	
Плотность: насыпная, т/м ³	1,72	1,82	1,90	
	средняя, г/см ³	3,42	3,36	3,30
	истинная, г/см ³	4,3	4,3	4,3
Общая пористость, %	0,20	0,22	0,23	
Порозность, м ³ /м ³	0,50	0,46	0,42	

Анализ таблиц 2.2-2.4 позволяет сделать вывод, что некондиционный агломерат имеет уменьшенную порозность, что отрицательно будет сказываться на газодинамике процесса при увеличенной общей пористости, что будет положительно сказываться на процессах восстановления в печи.

Согласно лабораторным экспериментам по исследованию газопроницаемости слоя агломерата, имеющего различную крупность (табл. 2.5), установили, что уменьшение эквивалентной по поверхности крупности

агломерата на 1 % в интервале 9,8 – 11,3 мм увеличивало потери напора газа на 5,8 % (табл. 2.6).

Таблица 2.3 – Ситовый состав агломерата фабрик ПАО «ММК»

Наименование показателей	Содержание фракций агломерата от общей массы, %		
	2	3	5
Номер аглофабрики	2	3	5
Класс крупности агломерата, мм:			
60-80	4,6	-	3,2
40-60	11,1	6,6	20,7
25-40	19,6	11,2	13,2
10-25	43,3	50,4	39,3
5-10	13,8	26,4	19,5
0-5	7,6	5,4	4,1
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

Таблица 2.4 – Ситовый состав агломерата фабрик ПАО «ММК» после складирования его в помещении МГТУ им. Носова сроком на один месяц

Наименование показателей	Содержание фракций агломерата от общей массы, %		
	2	3	5
Номер аглофабрики	2	3	5
Класс крупности агломерата, мм:			
40-60	3,8	1,2	6,5
25-40	8,1	1,9	7,8
10-25	44,4	49,0	42,1
5-10	24,9	31	27,7
0-5	18,8	16,9	15,9
Эквивалентная по поверхности крупность, мм	7,29	7,26	7,79
Средневзвешенная крупность, мм	14,64	12,54	15,63
Однородность	0,50	0,58	0,50

Таблица 2.5 – Крупность некондиционного агломерата фабрик ПАО «ММК», подвергаемого испытанию на газопроницаемость

Крупность, мм	Номер аглофабрики		
	2	3	5
Эквивалентная по поверхности	9,80	10,60	11,3
Средневзвешенная	18,97	16,62	19,92

Таблица 2.6 – Газопроницаемость агломерата фабрик ПАО «ММК»

Линейная скорость газового потока, м/с	Потеря напора газового потока, мм. вод. ст. /м слоя агломерата по номеру фабрики		
	2	3	5
0,052	11,3	10,4	9,4
0,073	19,6	19,2	18,4
0,089	28,9	28,1	27,2
0,103	36,1	34,1	33,1

Наряду с уменьшением крупности агломерата из-за длительного складирования перед загрузкой его в доменную печь ухудшаются и прочностные свойства агломерата в холодном состоянии и при восстановлении его при температуре 500 °С.

Холодная прочность некондиционного агломерата фабрик № 2, 3 и 5 ПАО «ММК» по сравнению с агломератом текущего производства изменилась следующим образом (табл. 2.7):

- уменьшалось сопротивление удару (+5 мм после испытания в барабане) на 0,43 % абс.;
- увеличилось разрушение годного агломерата (0,5-5 мм после испытания в барабане) на 0,43 % абс.;
- увеличилось истирание годного агломерата (0-0,5 мм после испытания в барабане) на 14,98 %.

Прочностные показатели некондиционного агломерата фабрик № 2, 3 и 5 ПАО «ММК» после восстановления при температуре 500 °С изменились по сравнению с таковыми у агломерата текущего производства следующим образом (табл. 2.8):

- уменьшалось сопротивление удару (+5 мм) на 3,72 % абс.;
- увеличилось разрушение годного агломерата (0,5-5 мм) на 2,6 % абс.;
- увеличилось истирание годного агломерата (0-0,5 мм) на 8,74 %.

Таблица 2.7 – Холодная прочность агломерата фабрик ПАО «ММК»

Вид агломерата	Показатели прочности, %		
	сопротивление годного агломерата удару (+5мм)	разрушение годного агломерата (0,5-5мм)	истирание годного агломерата (0-0,5мм)
кондиционный а/ф № 2	92,93	5,05	2,02
некондиционный а/ф № 2	92,46	5,03	2,51
кондиционный а/ф № 3	88,56	8,46	2,99
некондиционный а/ф № 3	88,06	8,46	3,48
кондиционный а/ф № 5	92,70	5,1	2,2
некондиционный а/ф № 5	92,50	5,2	2,3

Некондиционный агломерат имел более высокую степень восстановления по сравнению с агломератом текущего производства. В среднем для фабрик № 2, 3 и 5 степень восстановления при температуре 500 °С увеличилась от 3,8 до 4,3 % (табл. 2.9).

Более высокая степень восстановления некондиционного агломерата по сравнению с агломератом текущего производства обеспечивала увеличенное содержание FeO в агломерате после его восстановления. В среднем для фабрик 2, 3 и 5 ПАО «ММК» после восстановления агломерата при температуре 500 °С содержание FeO увеличилось с 10,53 % (табл. 2.1) до 17,83 в агломерате текущего производства и до 19,44 % в некондиционном агломерате (табл. 2.10). Это соответствует теории электронного и ионного обмена в химических реакциях, протекающих при восстановлении [11,18].

Таблица 2.8 – Прочность агломерата фабрик ПАО «ММК» после восстановления при температуре 500 °С

Вид агломерата	Показатели прочности, %		
	сопротивление годного агломерата удару (+5мм)	разрушение годного агломерата (0,5-5мм)	истирание годного агломерата (0-0,5мм)
кондиционный а/ф № 2	53,50	40,0	6,50
некондиционный а/ф № 2	52,76	40,7	6,53
кондиционный а/ф № 3	64,82	29,15	6,03
некондиционный а/ф № 3	62,81	31,16	6,03
кондиционный а/ф № 5	29,80	57,58	12,63
некондиционный а/ф № 5	27,04	58,16	14,80

Таблица 2.9 – Степень восстановления агломерата фабрик ПАО «ММК» при температуре 500 °С

Вид агломерата	Степень восстановления агломерата, %
кондиционный а/ф № 2	3,3
некондиционный а/ф № 2	4,2
кондиционный а/ф № 3	3,3
некондиционный а/ф № 3	3,3
кондиционный а/ф № 5	4,8
некондиционный а/ф № 5	5,5

Таблица 2.10 – Содержание FeO в агломерате после восстановления при температуре 500 °С

Вид агломерата	Содержание FeO, %
кондиционный а/ф № 2	16,34
некондиционный а/ф № 2	19,62
кондиционный а/ф № 3	16,64
некондиционный а/ф № 3	16,80
кондиционный а/ф № 5	20,51
некондиционный а/ф № 5	21,90

Выводы по главе 2

1. 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 различного агломерата в холодном состоянии и после восстановления при температуре 500 °С.

2. 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.

Глава 3 ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ЭФФЕКТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕКОНДИЦИОННОГО АГЛОМЕРАТА В ДОМЕННОМ ЦЕХЕ ПАО «ММК»

3.1 Влияние расхода некондиционного агломерата на технико-экономические показатели работы доменных печей

3.1.1 Анализ работы доменных печей объемом 1370 м³

Исследовали действие некондиционного агломерата на показатели работы доменных печей № 4 и 6 ПАО «ММК» объемом 1370 м³ каждая. По производственным результатам за период 2014-2018 гг. изучили 3 периода, продолжительностью каждого в среднем 63 суток, при работе доменной печи № 6 с содержанием некондиционного агломерата 1,4; 6,8 и 11,1 % от массы железорудной части шихты.

Исследовали влияние использования некондиционного агломерата в количестве 12,1 % от массы железорудной части шихты на изменение газодинамики в верхней части доменной печи № 4 ПАО «ММК» и ее технико-экономических показателей. Изменение показателей работы доменных печей в исследуемые периоды приведены в табл. 3.1-3.6.

Использование некондиционного агломерата, обладающего повышенным содержанием мелкой фракции, в доменной печи № 6 ПАО «ММК» снижало эквивалентную по поверхности крупность железорудного сырья согласно табл. 3.1. В периоде II по сравнению с периодом I эквивалентная крупность уменьшилась с 11,2 до 10,7 мм при уменьшении однородности железорудной части шихты от 0,65 до 0,63. В периоде III эквивалентная крупность составила 10,3 мм, однородность была равной 0,62.

Увеличение содержания некондиционного агломерата в периоде II по сравнению с периодом I от 1,4 до 6,8 % от массы железорудной части шихты

сопровождалось увеличением коэффициента сопротивления шихты движению газового потока в верхней части печи на 2,9 % согласно табл. 3.2.

Таблица 3.1 – Показатели качества шихтовых материалов в исследуемые периоды

Наименование показателей	Содержание некондиционного агломерата в массе железорудной части шихты, %				
	1,4	6,8	11,1	0	12,1
	Периоды				
	I	II	III	IV	V
Доменная печь	6			4	
Содержание фракции 0-5 мм в агломерате, %	6,6	7,51	8,2	6,18	8,84
Крупность железорудного сырья, мм: эквивалентная по поверхности средневзвешенная	11,2	10,7	10,3	11,3	10,0
	17,2	16,9	16,6	17,3	16,2
Однородность ЖРС по крупности	0,65	0,63	0,62	0,65	0,62
Содержание золы в коксе, %	12,64	12,69	12,70	12,45	12,47
Холодная прочность кокса по показателям, %: M10 M25	8,17	8,37	8,38	7,67	7,64
	87,8	87,4	87,3	88,1	87,6
Горячая прочность кокса (CSR), %	44,4	44,8	44,1	31,1	30,0
Реакционная способность кокса (CRI), %	35,8	35,4	35,8	44,4	45,9

Таблица 3.2 – Показатели газодинамического режима работы доменных печей № 6 и 4

Наименование показателей	Содержание некондиционного агломерата в массе железорудной части шихты, %				
	1,4	6,8	11,1	0	12,1
	Периоды				
	I	II	III	IV	V
Доменная печь	6			4	
Длительность периода, неделя	24	97	69	1	1
Коэффициент сопротивления шихты движению газов: в верхней части печи в нижней части печи	0,20	0,21	0,22	0,30	0,32
	8,28	8,67	8,85	6,74	7,07
Выход фурменного газа, м ³ /мин	3859	3826	3779	4020	4016

Для снижения напряженности по газодинамике в верхней части печи в периоде II по сравнению с периодом I уменьшили расход дутья от 2894 до 2875 м³/мин и природного газа от 18,2 до 17,3 тыс. м³/час (табл. 3.3) в условиях сохранения содержания кислорода на уровне 26,8 %. Изменение дутьевых параметров привело к снижению выхода фурменного газа от 3859 до 3826 м³/мин в периоде II по сравнению с периодом I (табл. 3.2).

Уменьшение интенсивности по дутью от 2,112 до 2,098 м³/м³ минуту в периоде II по сравнению с периодом I сопровождалось снижением производительности печи на 32 т/сутки (табл. 3.4).

Таблица 3.3 – Параметры дутья на доменных печах № 6 и 4

Наименование показателей	Содержание некондиционного агломерата в массе железорудной части шихты, %				
	1,4	6,8	11,1	0	12,1
	Периоды				
	I	II	III	IV	V
Расход: дутья, м ³ /мин	2894	2875	2830	2995	2987
м ³ /т чугуна	1135	1138	1118	1167	1194
природного газа, м ³ /т чугуна	120,4	116,6	120,3	124,4	130,1
тыс. м ³ /час	18,2	17,3	18,2	19,52	20,04
Степень открытия малого снорта, %	10	13	13	10,6	15,7
Давление горячего дутья, кПа	268	270	270	262,8	264,7
Температура дутья, °С	1155	1142	1142	1190	1187
Расход водяного пара, г/м ³	4,0	3,7	4,2	2,2	1,0
Содержание кислорода, %	26,8	26,8	27,1	27,89	27,91

Увеличение содержания некондиционного агломерата в периоде III по сравнению с периодом II от 6,8 до 11,1 % от массы железорудной части шихты сопровождалось увеличением коэффициента сопротивления шихты движению газового потока в верхней части печи на 6,7 % согласно табл. 3.2. Для уменьшения взаимной напряженности по силовому взаимодействию потоков шихты и газа в верхней части печи в периоде II по сравнению с периодом I понизили интенсивность дутья 1,6 % (табл. 3.3), что привело к уменьшению выхода фурменного газа на 47 м³/мин.

Увеличение содержания кислорода от 26,8 до 27,1 % и расхода природного газа от 17,3 до 18,2 тыс. м³/час (табл. 3.3) в периоде III по сравнению с периодом I положительно влияло на технико-экономические показатели работы доменной печи. Производительность печи повысилась при снижении удельного расхода кокса в соответствии с табл. 3.4.

Таблица 3.4 – Основные технологические показатели работы доменных печей № 6 и 4

Наименование показателей	Содержание некондиционного агломерата в массе железорудной части шихты, %				
	1,4	6,8	11,1	0	12,1
	Периоды				
	I	II	III	IV	V
Доменная печь	6			4	
Удельный расход кокса сухого, скипового), кг/т чугуна	439,9	445,1	443,2	405,5	404,1
Производительность по фактическому количеству загруженных подач, т/сутки	3670	3638	3645	3697	3602
Удельный расход коксовой фракции, кг/т чугуна	10,7	11,5	11,7	10,4	6,3
Расход, кг/т чугуна:					
сырьевых материалов	1670	1679	1675	1668	1668
в том числе кварцита	-	-	-	5,0	0,2
Содержание окатышей в железорудной части шихты, %	36,6	34,3	34,5	35,8	33,4
Интенсивность хода:					
по дутью, м ³ /м ³ минуту	2,112	2,098	2,065	2,186	2,180
по суммарному углероду, т/м ³ сутки	0,984	0,986	0,985	0,961	0,924
Вынос пыли, кг/т чугуна	11,1	11,7	14,9	11,4	13,0
Содержание железа в шихте, %	58,13	57,83	57,96	58,18	58,16
Рудная нагрузка, т/т	3,798	3,773	3,840	4,114	4,129

Таким образом, на доменной печи № 6 ПАО «ММК» увеличение содержания некондиционного агломерата на каждый 1 % в интервале от 1,4 до 11,1 % от массы железорудной части шихты сопровождалось повышением коэффициента сопротивления шихты движению газового потока в верхней части печи на 1,0 % при уменьшении интенсивности по дутью на 0,23 %. Это приводило к

уменьшению производительности печи на 0,68 % при повышении удельного расхода кокса на 0,75 %.

Таблица 3.5 – Параметры колошниковога газа доменных печей № 6 и 4

Наименование показателей	Содержание некондиционного агломерата в массе железорудной части шихты, %				
	1,4	6,8	11,1	0	12,1
	Периоды				
	I	II	III	IV	V
Доменная печь	6			4	
Состав колошниковога газа, %: CO ₂	18,30	18,21	18,38	19,7	19,59
CO	24,90	24,9	24,82	24,51	24
H ₂	8,72	8,64	8,74	9,58	9,57
Степень использования CO, %	42,4	42,2	42,5	44,5	44,9
Температура газа, °С:					
в газоотводах	186	178	181	180	207
на периферии под газоотводами	177	174	175	216	201
на периферии в шахте	333	339	328	404	419
Давление колошниковога газа, кПа	137	135	135	146,4	146,0
Температура газа по радиусу, °С, на расстоянии от защитной плиты колошника, м:					
0,97	215	209	206	132	150
1,37	194	187	188	134	151
1,87	173	164	167	121	138
2,37	158	146	149	125	142
3,22	267	248	253	110	130
4,3	454	458	449	214	204
Температура газа по радиусу, °С:					
на периферии (T _{пер})	215	209	206	132	150
в рудном гребне (T _{гр})	158	146	149	125	142
в центре печи (T _ц)	454	458	449	125	204
T _{пер} /T _{гр}	1,35	1,44	1,39	1,06	1,06
T _{пер} /T _ц	0,47	0,46	0,46	0,62	0,74
T _ц /T _{гр}	2,86	3,14	3,02	1,72	1,44
T _{пер} -T _{кол} , °С	147	161	147	224	212
Уровень засыпи, м	1,5	1,5	1,5	2,5	2,5

На доменной печи № 4 ПАО «ММК» в периоде V по сравнению с периодом IV загружали некондиционный агломерат в количестве 12,1 % от массы железорудной части шихты. Это сопровождалось увеличением мелких фракций в агломерате и как следствие, уменьшением межкусковых пустот в слое железорудного сырья согласно табл. 3.1.

Таблица 3.6 – Результаты химического анализа продуктов плавки доменных печей № 6 и 4

Наименование показателей	Содержание некондиционного агломерата в массе железорудной части шихты, %				
	1,4	6,8	11,1	0	12,1
	Периоды				
	I	II	III	IV	V
Доменная печь	6			4	
Содержание в чугунае, %: Si	0,77	0,78	0,78	0,71	0,67
Mn	0,23	0,32	0,30	0,17	0,18
S	0,018	0,017	0,017	0,02	0,02
Ti	0,061	0,062	0,063	0,07	0,08
P	0,058	0,060	0,061	0,05	0,04
C	4,688	4,698	4,698	4,79	4,79
V	0,081	0,081	0,081	0,09	0,10
Содержание в шлаке, %: SiO ₂	38,73	38,70	38,78	39,08	38,93
Al ₂ O ₃	10,62	10,63	10,61	10,87	10,91
TiO ₂	0,73	0,75	0,77	0,96	1,00
CaO	38,97	38,66	38,66	38,41	38,79
MgO	7,91	8,17	8,15	7,73	7,63
S	0,70	0,68	0,68	0,69	0,69
FeO	0,25	0,25	0,25	0,23	0,23
MnO	0,23	0,28	0,28	0,19	0,19
CaO/SiO ₂	1,01	1,00	1,00	0,98	1,00

Повышение содержания мелкой фракции агломерата вследствие загрузки в доменную печь некондиционного агломерата в количестве 12,1 % в периоде V по сравнению с периодом IV привело к уменьшению интенсивности по дутью на 0,27 % (табл. 3.3). В условиях некоторого увеличения расхода природного газа (табл. 3.3) в периоде V по сравнению с периодом IV уменьшение выхода фурменного газа составило 0,12 % (табл. 3.2). В результате в условиях

незначительного уменьшения выхода фурменного газа коэффициент сопротивления шихты движению газового потока в верхней части печи увеличился на 7,5 % (табл. 3.2).

Ухудшение газодинамики в верхней части печи в периоде V по сравнению с периодом IV понижало технико-экономические показатели ее работы. Производительность уменьшилась на 103 т/сутки при повышении удельного расхода кокса на 1,3 кг/т чугуна (табл. 3.4).

Таким образом, увеличение содержания некондиционного агломерата на каждый 1 % в интервале от 0 до 12,1 % от массы железорудной части шихты в условиях работы доменной печи № 4 ПАО «ММК» сопровождалось увеличением коэффициента сопротивления шихты движению газового потока в верхней части печи на 0,62 % при незначительном уменьшении интенсивности по дутью. Это приводило к уменьшению производительности печи на 0,23 % при повышении удельного расхода кокса на 0,03 %.

3.1.2 Анализ работы доменной печи объемом 2014 м³

Оценили действие некондиционного агломерата на показатели работы доменной печи № 10 ПАО «ММК» объемом 2014 м³. Исследовали четыре периода. В периоде I некондиционный агломерат не использовали в составе шихты. В периоде II его загружали в количестве 2,5 % от расхода железорудной части шихты. В периодах III и IV содержание некондиционного агломерата увеличили соответственно до 12,3 и 20,2 %. Изменение показателей работы доменной печи представлено в табл. 3.7-3.12.

Загрузка некондиционного агломерата в доменную печь № 10 ПАО «ММК» сопровождалось уменьшением среднего размера самих кусков используемых материалов и межкусковых пустот в слое шихты, располагающейся в колошниковом пространстве, с повышенной величиной рудной нагрузки. При загрузке 20,2 % некондиционного агломерата в доменную печь № 10 эквивалентная по поверхности крупность уменьшилась с 11,2 мм в периоде I до 9,7 мм в периоде IV (табл. 3.7).

Таблица 3.9 – Показатели газодинамического режима работы
доменной печи № 10

Наименование показателей	Содержание некондиционного агломерата в массе железорудной части шихты, %			
	0	2,5	12,3	20,2
Коэффициент сопротивления шихты движению газов:				
вверху шахты	0,84	0,71	0,65	0,95
в заплечиках	13,09	13,92	13,99	14,28
общий	9,35	9,67	9,62	10,49
Выход фурменного газа, м ³ /мин	6025	5924	5901	5610

Таблица 3.10 – Основные технологические показатели работы
доменной печи № 10

Наименование показателей	Содержание некондиционного агломерата в массе железорудной части шихты, %			
	0	2,5	12,3	20,2
Номер периода	I	II	III	IV
Длительность периода, сутки	7	5	7	6
Удельный расход кокса (сухого, скипового), кг/т чугуна:				
фактический	414,1	413,1	407,6	396,8
приведенный	414,1	416,3	417,9	406,6
Производительность, т/сутки:				
по фактическому количеству загруженных подач	5256	5237	5283	5095
приведенная	5256	5191	5165	4999
Расход, кг/т чугуна:				
сырьевых материалов	1681	1672	1672	1677
в том числе кварцита	5,9	3,5	1,2	0,2
Доля окатышей от ЖРС, %	29,4	31,0	33,4	30,1
Интенсивность хода:				
по дутью, м ³ /м ³ минуту	2,231	2,194	2,190	2,078
по суммарному углероду, т/м ³ сутки	0,926	0,922	0,920	0,861
Рудная нагрузка, т/т	4,059	4,048	4,101	4,226
Содержание Fe в шихте, %	57,767	58,067	58,087	57,897
Вынос пыли, кг/т чугуна	10,71	12,0	11,57	10,57

Таблица 3.11– Параметры колошникового газа доменной печи № 10

Наименование показателей	Содержание некондиционного агломерата в массе железорудной части шихты, %			
	0	2,5	12,3	20,2
Состав колошникового газа, %: CO ₂	19,04	19,46	19,37	19,58
CO	25,51	24,96	25,21	25,10
H ₂	8,56	8,84	8,76	9,1
Степень использования CO, %	42,74	43,76	43,44	43,82
Температура газа, °С:				
в газоотводах	181	165	160	171
на периферии под газоотводами	166	154	144	162
на периферии в шахте	405	336	351	340
Градиент температуры газа, °С:				
в газоотводах	24,6	23,3	25,8	24,5
на периферии под газоотводами	110,7	82,6	83,1	105,4
на периферии в шахте	218,0	175,1	202,8	201,7
Давление колошникового газа, кПа	150,8	150,0	150,1	147,6
Уровень засыпи фактический, м	1,44	1,54	1,41	1,56
Температура газа по радиусу, °С, на расстоянии от защитной плиты колошника, м:				
0,97	169	166	167	183
1,37	179	152	146	168
1,87	146	134	116	142
2,37	152	146	127	137
3,22	320	260	261	253
4,3	443	404	413	397
Температура газа по радиусу, °С:				
на периферии (T _{пер})	169	166	167	183
в рудном гребне (T _{гр})	152	146	127	137
в центре печи (T _ц)	443	404	413	397
T _{пер} /T _{гр}	1,11	1,14	1,31	1,34
T _{пер} /T _ц	0,38	0,41	0,40	0,46
T _ц /T _{гр}	2,91	2,77	3,25	2,91
T _{пер} -T _{кол} , °С	224	173	192	169

В периоде II по сравнению с периодом I использование некондиционного агломерата в количестве 2,5 % от расхода железорудной части шихты сопровождалось уменьшилась интенсивность по дутью от 2,231 до 2,194 м³/м³ минуту (табл. 3.8) при уменьшении выхода фурменного газа от 6025 до 5924 м³/минуту (табл. 3.9). Уменьшение выхода фурменного газа в периоде II по

сравнению с периодом I позволило уменьшить коэффициент сопротивления шихты движению газового потока в верхней части печи на 15,7 % (табл. 3.9).

Таблица 3.12 – Результаты химического анализа продуктов плавки доменной печи № 10

Наименование показателей	Содержание некондиционного агломерата в массе железорудной части шихты, %			
	-	2,5	12,3	20,2
Содержание в чугуне, %: Si	0,70	0,67	0,75	0,74
Mn	0,23	0,21	0,20	0,18
S	0,02	0,02	0,02	0,02
Ti	0,05	0,04	0,05	0,05
P	0,05	0,05	0,05	0,05
C	4,81	4,80	4,38	4,78
V	0,08	0,08	0,07	0,08
Содержание в шлаке, %: SiO ₂	39,31	39,53	39,58	39,19
Al ₂ O ₃	9,96	10,06	10,27	10,42
TiO ₂	0,58	0,64	0,60	0,67
CaO	39,95	40,04	38,89	39,25
MgO	7,39	7,19	7,24	7,26
FeO	0,24	0,26	0,25	0,25
MnO	0,19	0,20	0,22	0,18
CaO/SiO ₂	1,02	1,01	0,98	1,00

В периоде III по сравнению с периодом IV увеличили содержание некондиционного агломерата в шихте от 2,5 до 12,3 %. Уменьшение крупности агломерата, поступающего в доменную печь, компенсировали частично за счет увеличения доли окатышей на 2,4 %, частично за счет уменьшения выхода фурменного газа от 5924 до 5901 м³/мин. Для этого снизили расход дутья от 4419 до 4410 м³/мин при уменьшении расхода природного газа на 400 м³/час. Такие мероприятия позволили не увеличить величину коэффициента сопротивления шихты движению газового потока в верхней части печи.

Увеличение доли некондиционного агломерата с 12,3 до 20,2 % от расхода железорудной части шихты в периоде IV по сравнению с периодом III увеличило взаимное сопротивление потоков шихты и газа в верхней части печи. В периоде

IV по сравнению с периодом III увеличился коэффициент сопротивления шихты от 0,65 до 1,06 (табл. 3.9), уменьшилась интенсивность по дутью от 2,190 до 2,078 при снижении выхода фурменного газа от 5901 до 5610 м³/мин. В результате, уменьшилась производительность печи от 5283 до 5095 т/сутки (табл. 3.10).

В среднем рост содержания некондиционного агломерата в железорудной части шихты доменных печей № 10, 4 и 6 ПАО «ММК» на 1 % в интервале 0 – 20,2 % сопровождался увеличением коэффициента сопротивления шихты движению газового потока вверх 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 некондиционного агломерата в составе железорудной части шихты.

3.2 Физическое и математическое моделирование режимов загрузки некондиционного агломерата применительно к доменным печам №№ 2, 4, 6, 9 и 10 ПАО «ММК»

Ввиду ухудшения технико-экономических показателей работы доменных печей при использовании в составе шихты некондиционного агломерата целесообразно разработать рациональные режимы его загрузки в пространство печи. Для этого провели физическое (рис. 3.1 и рис. 3.2) и математическое моделирование загрузки некондиционного агломерата для различных параметров загрузки доменных печей ПАО «ММК» [111-122].

Исследовали характер распределения некондиционного агломерата (крупность менее 12 мм) по радиусу колошникового пространства при загрузке его в смеси с агломератом фракции более 12 мм окатышами, коксовым орешком, кварцитом и промывочными материалами при различных режимах загрузки:

- содержание агломерата фракции (-12) мм в интервале от 5 до 30 % от массы железорудного сырья, в том числе агломерат класса (-5) мм – 15 % при одновременном изменении содержания фракции (+12) мм;

- содержание окатышей в интервале 30-50% от железорудной части шихты;
- последовательность набора агломерат фракцией (-12) мм в бункер – размещение под фракцией (+12) мм над ней и в среднем ее слое;
- степень заполнения бункера БЗУ, 1 и 2 скипа;
- последовательность набора железорудных материалов в бункер БЗУ.



Рисунок 3.1 – Физическая модель однокоткового компактного загрузочного устройства лоткового типа

В ходе эксперимента было соблюдено равенство критерия Ньютона для реальной печи ($Ne_{дп}$) и модели ($Ne_{м}$). При проведении исследований все эксперименты дублировали, после чего находили дисперсию каждого опыта. Затем по критерию Кохрена определяли однородность данного ряда дисперсий. Обработкой экспериментальных данных выявляли переменные, имеющие наибольшее влияние на выходной параметр для построения математических зависимостей. Значимость коэффициентов полученных уравнений оценивали по критерию Стьюдента. Все полученные зависимости проверяли на адекватность воспроизведения экспериментальных данных по критерию Фишера.



Рисунок 3.2 – Скиповая система загрузки шихтовых материалов в физическую модель бесконусного загрузочного устройства

Распределение 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 режима загрузки можно описать следующим уравнением, $R^2 = 0,55$ (рис. 3.3):

$$A_{HEK} = -22,3 + 0,89 A_{OK} + 36,8 N_{об} - 0,45 A_{OK} N_{об} - 3,83 N_{об}^2 \quad (3.1)$$

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

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

Адекватность уравнения 3.1. проверено по критерию Фишера. Расчетное значение, равное 0,72, меньше табличной величины.



Рисунок 3.3 – Содержание некондиционного агломерата от его расхода, загружаемого на колошник со станций углового положения лотка по ходу его движения при односкиповом заполнении бункера и поступлении агломерата в скип первым (-■-) и последним (-◆-)

Согласно рисунку 3.3 при размещении некондиционного агломерата в нижней части скипа его содержание в массе шихты, поступающей из бункера БЗУ, со станций углового положения лотка по ходу его движения будет следующим: 17 % на первой станции, 57 % на второй и 26 % на третьей. При загрузке некондиционного агломерата в скип последним его содержание в массе шихты, поступающей из бункера БЗУ, со станций углового положения лотка по ходу его движения будет следующим: 55 % на первой станции, 25 % на второй и 20 % на третьей.

При загрузке в бункер БЗУ двух скипов распределение 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) можно описать следующими уравнениями:

- при размещении некондиционного агломерата в смеси с кондиционным агломератом в нижней части бункера БЗУ под окатышами и добавочными

материалами (обеспечивается загрузкой агломерата навверх первого рудного скипа), $R^2 = 0,96$:

$$A_{\text{низ}}^{\text{нек}} = -1,0477N_{\text{ст}}^3 + 12,801N_{\text{ст}}^2 - 47,273N_{\text{ст}} + 64,973 \quad (3.2)$$

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), $R^2 = 0,94$:

$$A_{\text{верх}}^{\text{нек}} = 1,2364N_{\text{ст}}^3 - 15,385N_{\text{ст}}^2 + 56,575N_{\text{ст}} - 38,887 \quad (3.3)$$

- 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 навверх второго рудных скипа), $R^2 = 0,97$:

$$A_{\text{сеп}}^{\text{нек}} = 0,7704N_{\text{ст}}^3 - 9,5122N_{\text{ст}}^2 + 35,888N_{\text{ст}} - 21,297 \quad (3.4)$$

- при размещении некондиционного агломерата в смеси с кондиционным агломератом в бункере БЗУ в нижней части бункера и в среднем слое железорудного сырья (обеспечивается загрузкой агломерата навверх первого и второго рудных скипов), $R^2 = 0,99$:

$$A_{\text{низ,сеп}}^{\text{нек}} = -0,2262N_{\text{ст}}^3 + 2,6539N_{\text{ст}}^2 - 11,821N_{\text{ст}} + 34,418 \quad (3.5)$$

- при размещении некондиционного агломерата в смеси с кондиционным агломератом в бункере БЗУ в среднем слое железорудного сырья и над ним (обеспечивается загрузкой агломерата вниз первого и второго рудных скипов), $R^2 = 0,96$:

$$A_{\text{верх,сеп}}^{\text{нек}} = 1,1119N_{\text{ст}}^3 - 12,893N_{\text{ст}}^2 + 44,245N_{\text{ст}} - 24,375 \quad (3.6)$$

Визуализация уравнений 3.2.-3.5 дает рисунки 3.4-3.5.

При двухскиповом заполнении бункера и размещении некондиционного агломерата в нижней части бункера БЗУ с первой по ходу движения лотка

станции поступает основная часть мелкой фракции агломерата. По истечении 50 % времени формирования порций от общей продолжительности выпуска содержание мелкой фракций 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 фракций агломерата -12 мм приходится на середину выпуска компонентов шихты из бункера БЗУ в колошниковое пространство.

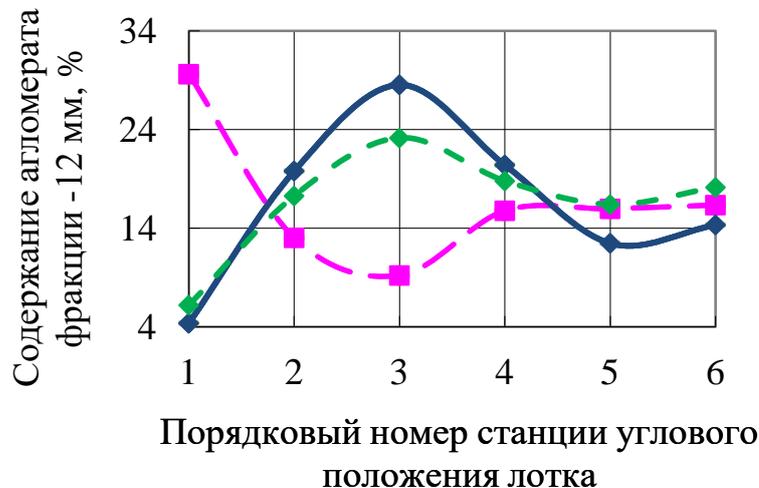


Рисунок 3.4 – Содержание некондиционного агломерата от его расхода, загружаемого на колошник со станций углового положения лотка по ходу его движения при двухскиповом заполнении бункера и поступлении агломерата последним в первый скип (-■-), первым во второй скип (—◆—), последним во второй скип или первым в первый скип (--▲--)

Промышленными исследования (см. глава 4) установлено, что для эффективного использования некондиционного агломерата следует его размещать преимущественно в зоне рудного гребня и промежуточной зоне между периферией и рудным гребнем, то есть с позиций углового положения лотка №№ 5-9.

Наложением результатов физического и математического моделирования на текущие матрицы загрузки доменных печей № 2, 4, 6, 9 и 10 ПАО «ММК», оценили возможность рационального распределения некондиционного агломерата по радиусу колошниковое пространство, используя различную последовательность набора материалов в бункер.

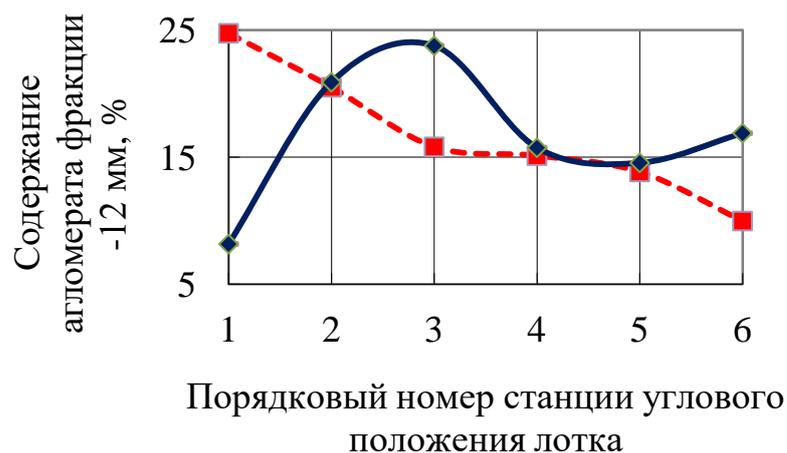


Рисунок 3.5 – Содержание некондиционного агломерата от его расхода, загружаемого на колошник со станций углового положения лотка по ходу его движения при двухскиповом заполнении бункера и поступлении агломерата последним в первый и второй скипы (-■-), первым в первый и второй скипы (—◆—)

Для матрицы загрузки доменной печи № 2 (табл. 3.13) рациональное размещение некондиционного агломерата можно обеспечить двумя вариантами.

Таблица 3.13 – Матрицы загрузки доменных печей № 2 и 4 (К – кокс, Р – ЖРС)

Вид материала для ДП № 2	Количество оборотов лотка по станциям 1-11 и порциям материалов К, Р на доменных печах																				Вид материала для ДП № 4	
	2										4											
	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	11	10	9	8	7	6	5	4	3		2
К		1	2										1	1	1	1	1	1				К
К		1		2	1		1	1				1	1	1	1	1	1					Р
Р			1	1	1								1	1	1	2	1					К
Р				2	1	1	1	1											1	1		К
К	1		1	1								1	1	1	1	1	1					Р
К					1	2	1	1	1				1	1	1	1		1	1			К
Р			1	1	1								1	2	2	1						Р
Р				1	1	2	2					1	1	1	1	1	1					К
К		1	1	1							1	1	1	1	1	1						Р
К					2	1	1	1	1					1	1	1	2	1				К
Р			1	1	1								1	1								К
Р					1	2	1	2				1	1	1	1	1	1					Р
													1	1	1	1		1	1			К
												1	1	1	1	1	1					Р

Вариант 1. В первый рудный скип (выгрузка одного скипа из бункера БЗУ) осуществляется загрузка некондиционного агломерата, затем основная масса шихтовых материалов. Распределение некондиционного агломерата по станциям углового положения лотка будет следующим:

Доля некондиционного агломерата (%), поступающего со станций
углового положения лотка

11	10	9	8	7	6	5	4
		17	57	26			

Вариант 2. Во второй и третий рудные скипы (выгрузка двух скипов из бункера БЗУ) необходимо загружать основную массу шихты, после чего некондиционный агломерат. Распределение некондиционного агломерата по станциям углового положения лотка будет следующим:

Доля некондиционного агломерата (%), поступающего со станций
углового положения лотка

11	10	9	8	7	6	5	4
			28	22	25	15	10

Для матрицы загрузки доменной печи № 4, (выгрузка двух скипов из бункера БЗУ, табл. 3.13) рациональное размещение некондиционного агломерата можно обеспечить следующим режимом загрузки. Во второй рудный скип осуществляется загрузка некондиционного агломерата, затем основная масса шихтовых материалов. Распределение некондиционного агломерата по станциям углового положения лотка будет следующим:

Доля некондиционного агломерата (%), поступающего со станций
углового положения лотка

11	10	9	8	7	6	5	4
1	6	19	30	21	13	10	

Для матрицы загрузки доменной печи № 6 (выгрузка одного скипа из бункера БЗУ, табл. 3.14) рациональное размещение некондиционного агломерата можно обеспечить следующими режимами загрузки.

Вариант 1. В первый рудный скип осуществляется загрузка некондиционного агломерата, затем основная масса шихтовых материалов. Распределение некондиционного агломерата по станциям углового положения лотка будет следующим:

Доля некондиционного агломерата (%), поступающего со станций углового положения лотка

11	10	9	8	7	6	5	4
	6	30	47	17			

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

Доля некондиционного агломерата (%), поступающего со станций углового положения лотка

11	10	9	8	7	6	5	4
				37	35	22	7

Таблица 3.14 – Матрицы загрузки доменной печи № 6

Вид материала для ДП № 6	Количество оборотов лотка по станциям 1-11 и порциям материалов К, Р										
	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
К			1	1	1						
К							1	1	1		
Р			1	1	1						
Р						1	1	1			
К				1	1	1					
К							1	1	1		
Р		1	1	1							
Р					1	1	1				
К		1	1	1							
К					1	1	1			2	
Р			1	1	1						
Р					1	1	1				

Для матрицы загрузки доменной печи № 9, (выгрузка двух скипов из бункера БЗУ, табл. 3.15) рациональное размещение некондиционного агломерата можно обеспечить следующим режимом загрузки. В первый и второй рудные скипы осуществляется загрузка некондиционного агломерата, затем основная масса шихтовых материалов. Распределение некондиционного агломерата по станциям углового положения лотка будет следующим:

Доля некондиционного агломерата (%), поступающего со станций

углового положения лотка

11	10	9	8	7	6	5	4
	13	28	24	11	11	13	3

Таблица 3.15 – Матрицы загрузки доменных печей № 9 и 10

(К – кокс, Р – железорудная часть шихты)

Вид материала для ДП № 9	Количество оборотов лотка по станциям 1-11 и порциям материалов К, Р на доменных печах																						Вид материала для ДП № 10
	9											10											
	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	
К				1	1	1	1	2	1						1	1	2	1	1	1			К
Р		1	1	2	1		1	1				1	2		1	1		1	1				Р
К					1	2	2	1	1						1	2	1	1	1	1			К
Р		1	1	1	1	1	1	1				2	1		1		1	1	1				Р
К					1	2	2	1		1					1	1	1	1	1	1	1		К
Р		2	1	1		1	1	1				1	1	1	1	1	1	1	1				Р
К		1	1	1	2	1	1								1	1	1	2	1	1			К
Р		1	2	1	1	1	1					1	1	1			1	1	1	1			Р

Для матрицы загрузки доменной печи № 10, (выгрузка двух скипов из бункера БЗУ, табл. 3.15) рациональное размещение некондиционного агломерата можно обеспечить следующим режимом загрузки. В первый и второй рудные скипы осуществляется загрузка некондиционного агломерата, затем основная масса шихтовых материалов. Распределение некондиционного агломерата по станциям углового положения лотка будет следующим:

Доля некондиционного агломерата (%), поступающего со станций
углового положения лотка

11	10	9	8	7	6	5	4
4	20	22	10	12	8	16	8

3.3 Разработка алгоритма выбора печи в доменном цехе ПАО «ММК» для загрузки в нее некондиционного агломерата

В противоточной зоне доменной печи происходит движение материалов к горну, преодолевая силу трения о футеровку, подъёмную силу газового потока и накапливающихся продуктов плавки. Чем лучше состояние печи и процессов, тем за меньшее время пребывания материалов в этой зоне развивается формирование чугуна и шлака. Для эффективного использования некондиционного агломерата при производстве чугуна в доменных печах необходимо загружать его в агрегаты, работающие с наименьшим сопротивлением потоков шихты и газа. В условиях доменного цеха ПАО «ММК» в работе находится 8 доменных печей, в связи с чем имеется необходимость в разработке алгоритма выбора печей в доменном цехе ПАО «ММК» для загрузки в нее некондиционного агломерата.

В качестве основы для разработки данного алгоритма использовали формулу Павлова М.А. по времени пребывания материалов во всей печи (τ):

$$\tau = \frac{24 \cdot V_n}{\Pi \cdot \nu_{ш}}, \quad (3.7)$$

где V_n – полезный объём печи, м³;

Π – производительность, т/сутки;

$\nu_{ш}$ - объём материалов в печи, приходящийся на 1 т чугуна.

Противоточной является часть печи, в которой шихтовые материалы и газовый поток взаимодействуют между собой в процессе движения навстречу друг другу.

Для применения этой формулы определили объём противоточной зоны вычитанием из V_n , объёма от верхней кромки колошника до уровня засыпи ($V_{кз}$, не занятого шихтой) и части объёма горна, не относящегося к зоне потока ($V_{нзп}$).

Объём $V_{кз}$ характеризуется выражением:

$$V_{кз} = \frac{\pi \cdot h_z \cdot d_k^2}{4} \quad (3.8)$$

где h_z – расстояние от верхней кромки колошника до поверхности шихты, м;

d_k – диаметр колошника, м.

Для определения объёма $V_{нзп}$ имеется разработка Бабарыкина Н.Н.:

$$V_{нзп} = V_{фл} - \frac{(d_{Г} - l_{см})^3}{4 \cdot f_0 \cdot (1 + m)} \quad (3.9)$$

где $V_{фл}$ – объём горна от оси воздушных фурм до оси чугунных лётков, м³;

$d_{Г}$ – диаметр горна, м;

$l_{см}$ – 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.

Объём $V_{фл}$ характеризуется выражением:

$$V_{фл} = \frac{\pi \cdot h_{фл} \cdot d_{Г}^2}{4} \quad (3.10)$$

где $h_{фл}$ – высота горна от воздушных фурм до чугунных лётков, м.

Расстояние от стенки горна до зоны малоподвижных материалов определяется суммированием составляющих:

$$l_{см} = l_{вф} + l_{рч} \quad (3.11)$$

где $l_{вф}$ – высов фурм, м;

$l_{рч}$ – протяжённость рыхлой части зоны в радиальном направлении, мм.

Для расчёта ($l_{рч}$, мм) получена формула, исходя из равенства подъёмной силы фурменного газа, выходящего из зоны горения, давлению окружающих материалов:

$$l_{\text{рч}} = \frac{1000}{\sqrt{K_{\phi} d_{\phi}}} \sqrt{\frac{V_{\phi} \Pi}{86400 \pi n_{\phi}}} \sqrt{\frac{\gamma_{\phi} (t_{z\phi} + 273)}{546 (P_{\phi} + 1 - \Delta P_{\phi}) h_{\phi\phi}}}, \quad (3.12)$$

где d_{ϕ} – диаметр фурм, м;

K_{ϕ} – соотношение между протяжённостью зоны циркуляции по окружности и диаметром фурм;

V_{ϕ} – выход фурменного газа, м³/т чугуна;

n_{ϕ} – количество фурм в работе;

γ_{ϕ} – плотность фурменного газа, кг/м³;

$t_{z\phi}$ – температура газа на выходе из рыхлой части зоны горения, °С;

P_{ϕ} – давление дутья, ати;

ΔP_{ϕ} – потери напора дутья от места замера давления до торца фурм, ати;

$h_{\phi\phi}$ – динамический напор газа на выходе из фурменного очага, Па.

Рассчитали $\tau_{\text{пт}}$ по месяцам 2020 г. для печи объемом 2014 м³ ПАО «ММК»:

месяцы	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$\tau_{\text{пт}}$, 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 этого агломерата пропорционально росту времени пребывания материалов в противоточной зоне ($\tau_{\text{пт}}$) для повышения интенсивности работы печей;

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

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

- распределение этого 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.

Вариант распределения 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:

$$K_j = h_{dk} / J_p; \quad (3.13)$$

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

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

Динамический напор газа на колошнике (h_{dk}) рассчитали по формуле:

$$h_{dk} = \frac{g_{к2}^2 \gamma_{к2}}{2} \cdot \frac{t_{к2} + 273}{(P_{к2} + 1) \cdot 273}; \quad (3.14)$$

где $g_{к2}$ – скорость колошниковога газа при нормальных условиях, м/с;

$\gamma_{к2}$ – плотность колошниковога газа при нормальных условиях
кг/м³;

$P_{к2}$ – давление колошниковога газа сверх атмосферной величины,
ати;

$t_{к2}$ – температура колошниковога газа, °С.

$$g_{к2} = \frac{V_{к2} \cdot \Pi}{24 \cdot 3600 \cdot S_{к}}; \quad (3.15)$$

где $V_{к2}$ – выход влажного колошниковога газа, м³/т чугуна;

Π – производительность доменной печи, т/сутки;

$S_{к}$ – площадь сечения колошника, м².

Определили приоритетность использования некондиционного агломерата на печах с $\tau_{пт}$, равной величине меньше средней по цеху, по критерию K_j .

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

Результаты расчета длительности пребывания материалов в противоточной зоне и критерия K_j для доменных печей ПАО «ММК» приведены в табл. 3.16.

Таблица 3.16 – Результаты расчета длительности пребывания материалов в противоточной зоне и критерия K_j

Показатели	Величины показателей для доменных печей ПАО «ММК»							
	1	2	4	6	7	8	9	10
Длительность движения материалов в противоточной зоне, час	3,97	3,57	4,14	4,02	4,70	4,81	5,15	4,03
Величина K_j	0,56	0,47	0,61	0,52	0,45	0,40	0,63	0,65
Удельная производительность, т/м ³	2,52	2,80	2,41	2,48	2,13	2,08	1,94	2,48
Удельный расход кокса, кг/т чугуна	417,0	439,3	450,0	455,7	473,3	458,2	461,5	450,6

Выводы по главе 3

1. Исследовали влияние расхода некондиционного агломерата на газодинамику доменного процесса в верхней части доменных печей № 4, 6 объемом 1370 м³, доменной печи № 10 ПАО «ММК» объемом 2014 м³ и технико-экономические показатели их работы.

2. В среднем рост содержания некондиционного агломерата в железорудной части шихты доменных печей № 10, 4 и 6 ПАО «ММК» на 1 % в интервале 0 – 20,2 % сопровождался увеличением коэффициента сопротивления шихты

движению газового потока вверх шахты на 0,98 %. Уменьшение интенсивности по дутью составило 0,19 %.

3. 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 некондиционного агломерата в составе железорудной части шихты.

4. 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 и двухскипового режимов наполнения бункера.

5. При размещении некондиционного агломерата в нижней части бункера БЗУ с первой по ходу движения лотка станции поступает основная часть мелкой фракции агломерата. По истечении 50 % времени формирования порций от общей продолжительности выпуска содержание мелкой фракций 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 фракций агломерата -12 мм приходится на середину выпуска компонентов шихты из бункера БЗУ в колошниковое пространство.

6. Наложением результатов физического и математического моделирования на текущие матрицы загрузки доменных печей № 2, 4, 6, 9 и 10 ПАО «ММК», оценили возможность рационального распределения некондиционного агломерата по радиусу колошникового пространства, используя различную последовательность набора материалов в бункер.

7. Предложен алгоритм выбора печей в доменном цехе ПАО «ММК» для загрузки в нее некондиционного агломерата, разработанный на основе времени пребывания материалов в печи и показателя уравнивания силы тяжести железорудного сырья подъемной силой газового потока.

Глава 4 РАЗРАБОТКА И ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ЗАГРУЗКИ НЕКОНДИЦИОННОГО АГЛОМЕРАТА В ДОМЕННЫЕ ПЕЧИ ПАО «ММК»

Для выявления рациональных режимов использования некондиционного агломерата в доменных печах ПАО «ММК», обеспечивающих стабильную работу агрегатов по газодинамике в верхней их части, исследовали следующие мероприятия [123-129]:

- ввод некондиционного агломерата в шихту совместно с увеличением в ней доли окатышей;
- ввод некондиционного агломерата в шихту совместно с увеличением доли агломерата фабрики № 5;
- ввод некондиционного агломерата в шихту совместно с коксовой фракцией;
- направление некондиционного агломерата в локальные зоны по сечению колошника.

4.1 Загрузка некондиционного агломерата совместно с повышением доли окатышей

На доменных печах №№ 9 и 6 исследовали совместное действие загрузки некондиционного агломерата и повышения доли окатышей в железорудной части шихты. Результаты работы печей приведены в табл. 4.1-4.9.

На печи № 9 исследовали три периода. В периоде I расход некондиционного агломерата составлял 3,1 % от железорудной части шихты. В периоде II по сравнению с периодом I расход некондиционного агломерата увеличили с 3,1 до 13,7 % при одновременном увеличении доли окатышей в составе шихты от 31,1 до 36,5 % (табл. 4.1). Увеличение доли окатышей осуществляли за счет роста доли Соколовских окатышей при уменьшении содержания окатышей Михайловского

ГОК, что положительно сказывалось на эквивалентной по поверхности крупности железорудного сырья.

Таблица 4.1 – Состав по видам и крупности железорудных материалов

Наименование показателей	Содержание некондиционного агломерата в массе железорудной части шихты, %				
	3,1	13,7	21,4	0	5,6
Номер доменной печи	9			6	
Номер периода	I	II	III	IV	V
Содержание окатышей от железорудной части шихты, %	31,1	36,5	33,1	34,5	37,9
в том числе:					
Михайловские	22,6	17,1	15,7	21,3	12,2
Соколовские неофлюсованные	8,5	19,4	17,5	13,2	25,7
Горячая прочность окатышей по LTD(+6,3), %:					
Михайловские	92,80	93,54	92,80	92,56	92,80
Соколовские неофлюсованные	71,53	70,80	71,00	70,96	70,88
Средневзвешенная	86,99	81,45	81,31	84,30	77,88
Горячая прочность агломерата по LTD(+6.3), %	58,4	57,2	56,4	60,1	58,8
Горячая прочность железорудных материалов по LTD(+6,3), %	66,7	65,7	64,5	68,4	65,8
Эквивалентная по поверхности крупность, мм:					
агломерата кондиционного	10,00	10,16	9,28	10,21	10,08
окатышей	10,95	11,42	11,32	11,27	12,01
железорудного сырья	10,19	10,56	9,94	10,57	10,77
Средневзвешенная крупность, мм:					
агломерата кондиционного	18,55	18,93	18,03	18,70	18,80
окатышей	12,83	13,24	13,18	13,02	13,02
железорудного сырья	16,59	16,76	16,38	16,72	16,53

В периоде II по сравнению с периодом I улучшилось качество текущего агломерата. Содержание фракции 0-5 мм в периоде II по сравнению с периодом I уменьшилось от 8,69 до 7,19 % (табл. 4.2), что уменьшило вынос пыли из доменной печи согласно табл. 4.3.

Компенсирование негативного влияния расхода некондиционного агломерата в количестве 13,7 % в периоде II увеличением доли окатышей на 5,4 % при

одновременном улучшении качества текущего агломерата по содержанию фракции 0-5 мм, которое уменьшилось на 1,5 % абс.. Это сопровождалось снижением коэффициента сопротивления шихты движению газового потока в верхней части печи на 12,8 % (табл. 4.4) в условиях повышения расхода дутья от 3785 до 3863 м³/мин (табл. 4.5).

Таблица 4.2 – Показатели качества шихтовых материалов

Наименование показателей	Содержание некондиционного агломерата в массе железорудной части шихты, %				
	3,1	13,7	21,4	0	5,6
Номер доменной печи	9			6	
Номер периода	I	II	III	IV	V
Содержание фракции 0-5 мм в кондиционном агломерате	8,69	7,19	8,87	8,54	8,72
Содержание золы в коксе	12,08	12,13	12,10	12,02	12,12
Холодная прочность кокса по показателям, %: M10	7,0	7,1	7,2	8,5	7,8
	M25	88,8	88,7	88,7	85,7
Горячая прочность кокса по CSR, %	26,17	28,59	26,83	34,18	33,21
Реакционная способность кокса (CRI), %	45,60	43,84	45,90	39,53	38,83

Повышение доли окатышей в периоде II по сравнению с периодом I способствовало улучшению газопроницаемости в периферийной части печи, на что указывает рост градиента температур между температурами периферийного и колошниковога газа от 127 до 152 °С (табл. 4.6).

Самопроизвольное перетекание окатышей в пристеночную зону печи в периоде II сопровождалось увеличением температуры холодильников шахты в периоде II по сравнению с периодом I от 56,4 до 62,4 °С (табл. 4.7).

Рациональная организация доменной плавки в условиях загрузки некондиционного агломерата сопровождалась увеличением степени использования водорода от 43,1 до 45,1 % при некотором уменьшении степени использования монооксида углерода согласно табл. 4.6. Повышение химической

степени использования газового потока обеспечило снижение удельного расхода кокса от 413,6 до 408,0 кг/т чугуна при сохранении производительности печи.

Таблица 4.3 – Основные технологические показатели работы доменных печей № 9 и 6

Наименование показателей	Содержание некондиционного агломерата в массе железорудной части шихты, %				
	3,1	13,7	21,4	0	5,6
Номер доменной печи	9			6	
Длительность периода, сутки	6	7	6	11	10
Удельный расход кокса (сухого, скипового), кг/т чугуна: фактический	413,6	402,9	407,9	451,4	445,7
	413,6	408,0	413,8	451,4	450,0
Производительность, т/сутки: по фактическому количеству загруженных подач	5042	5077	4874	3300	3400
	5042	5042	4906	3300	3307
Расход, кг/т чугуна: сырьевых материалов	1672	1670	1658	1672	1663
	13,7	8,0	2,6	2,1	8,2
Интенсивность хода по дутью, м ³ /м ³ минуту	1,880	1,918	1,888	1,895	1,903
	0,889	0,871	0,848	0,933	0,948
Рудная нагрузка, т/т	4,037	4,115	4,097	3,705	3,731
Содержание Fe в шихте, %	58,148	58,573	58,100	58,062	58,401
Вынос пыли, кг/т чугуна	9,2	8,7	7,7	10,2	13,1
	5,3	5,0	4,4	6,3	8,1

В периоде III по сравнению с периодом II расход некондиционного агломерата увеличился от 13,7 до 21,4 % от расхода железорудной части шихты. Доля окатышей уменьшилась от 36,5 до 33,1 %. Содержание фракции 0-5 мм в агломерате текущего производства увеличилось от 7,19 до 8,87 %. Изменение шихтовых условий сопровождалось увеличением коэффициента сопротивления

шихты движению газового потока в верхней части печи на 9,9 % при уменьшении выхода фурменного газа на 68 м³/мин в периоде III по сравнению с периодом II.

Таблица 4.4 – Показатели газодинамического режима работы доменных печей № 9 и 6

Наименование показателей	Содержание некондиционного агломерата в массе железорудной части шихты, %				
	3,1	13,7	21,4	0	5,6
Номер доменной печи	9			6	
Номер периода	I	II	III	IV	V
Коэффициент сопротивления шихты движению газов:					
на колошнике	0,70	0,61	0,68	0,21	0,14
в горне	7,71	7,53	7,79	15,04	14,25
общее	5,83	5,56	5,86	9,61	8,99
Выход фурменного газа, м ³ /мин	5116	5201	5133	3490	3511

Таблица 4.5 – Параметры дутья на доменных печах № 9 и 6

Наименование показателей	Содержание некондиционного агломерата в массе железорудной части шихты, %				
	3,1	13,7	21,4	0	5,6
Номер доменной печи	9			6	
Номер периода	I	II	III	IV	V
Расход: дутья, м ³ /мин	3785	3863	3802	2596	2607
м ³ /т чугуна	1081	1096	1123	1133	1104
природного газа, м ³ /т чугуна	107,6	109,0	114,8	121,2	115,9
тыс. м ³ /час	23,9	24,1	25,1	16,1	15,9
Степень открытия малого снорта, %	19	19	20	17	11
Давление горячего дутья, кПа	284	283	285	262	256
Температура дутья, °С	1055	1055	1055	1151	1148
Расход водяного пара, г/м ³	4,4	3,5	3,5	3,8	3,8
Содержание кислорода, %	28,3	28,2	28,2	27,8	28,2
Теоретическая температура горения, °С	2017	2012	2011	2086	2117

В результате увеличение некондиционного агломерата в периоде III по сравнению с периодом II без компенсирования его отрицательного влияния на газодинамику верхней части печи сопровождалось уменьшением производительности печи от 5042 до 4906 т/сут при увеличении удельного расхода кокса от 408,0 до 413,8 кг/т чугуна.

Таблица 4.6 – Параметры колошниковога газа доменных печей № 9 и 6

Наименование показателей	Содержание некондиционного агломерата в массе железорудной части шихты, %				
	3,1	13,7	21,4	0	5,6
Номер доменной печи	9			6	
Номер периода	I	II	III	IV	V
Состав колошниковога газа, %:					
CO ₂	19,75	19,79	19,52	18,36	19,33
CO	24,42	24,97	25,08	25,32	25,68
H ₂	8,92	8,80	8,85	8,60	8,44
Степень использования, %:					
CO	44,7	44,2	43,8	42,1	42,9
H ₂	43,1	45,1	46,9	45,7	47,2
Температура газа, °С:					
в газоотводах	165	170	184	184	202
на периферии под газоотводами	162	170	195	155	187
на периферии в шахте	292	322	342	253	235
Градиент температуры газа, °С:					
в газоотводах	78	84	92	34	32
на периферии под газоотводами	151	163	212	34	24
на периферии в шахте	434	526	498	124	143
Давление колошниковога газа, кПа	152,3	151,3	151,2	142,1	141,3
Уровень засыпи фактический, м	1,18	1,08	1,07	2,01	2,49
Температура газа по радиусу, °С, на расстоянии от кладки, м:					
0,97	116	123	134	197	209
1,37	151	153	174	188	206
1,87	92	95	99	174	196
2,37	110	112	126	160	190
3,22	111	74	119	248	271
4,3	184	206	235	328	332
Температура газа по радиусу, °С:					
на периферии (T _{пер})	116	123	134	197	209
в рудном гребне (T _{гр})	110	114	126	160	190
в центре печи (T _ц)	184	206	235	328	332
T _{пер} /T _{гр}	1,05	1,08	1,06	1,23	1,10
T _{пер} /T _ц	0,63	0,60	0,57	0,60	0,63
T _ц /T _{гр}	1,67	1,82	1,86	2,06	1,75
T _{пер} -T _{кол} , °С	127	152	158	68,5	33,1

Таблица 4.7 – Температура холодильников шахты доменных печей № 9 и 6

Наименование показателей	Содержание некондиционного агломерата в массе железорудной части шихты, %				
	3,1	13,7	21,4	0	5,6
Номер доменной печи	9			6	
Номер периода	I	II	III	IV	V
Температура холодильников шахты, °С: 1-го ряда	-	-	-	45,6	46,2
3-го ряда	61,5	66,7	67,0	45,7	50,0
4-го ряда	51,2	58,2	60,3	47,4	50,1
6-го ряда	-	-	-	35,5	36,3
Среднеарифметическая температура, °С	56,4	62,4	63,7	43,5	45,6

На доменной печи № 6 ПАО «ММК» исследовали два периода (IV и V). В периоде IV некондиционный агломерат в составе шихты не загружали. В периоде V его загружали в количестве 5,6 % от расхода железорудной части шихты. Для компенсации отрицательного влияния некондиционного агломерата на газодинамику верхней части доменной печи увеличили долю окатышей от 34,5 до 37,9 % за счет роста содержания Соколовских окатышей при уменьшении содержания окатышей Михайловского ГОК согласно табл. 4.1.

Таблица 4.8 – Показатели дренажной способности коксовой насадки в горне доменных печей № 9 и 6

Наименование показателей	Содержание некондиционного агломерата в массе железорудной части шихты, %				
	3,1	13,7	21,4	0	5,6
Номер доменной печи	9			6	
Количество шлака, остающегося в горне, т	17,55	21,17	21,19	15,12	13,79
Подвижность шлака, Па·с	0,53	0,41	0,55	0,58	0,74
Показатель DMI	125	133	310	156	150
Растворимость углерода в чугуна, %	97,90	88,79	97,18	96,79	96,92

Таблица 4.9 – Результаты химического анализа продуктов плавки
доменных печей № 9 и 6

Наименование показателей	Содержание некондиционного агломерата в массе железорудной части шихты, %				
	3,1	13,7	21,4	0	5,6
Номер доменной печи	9			6	
Номер периода	I	II	III	IV	V
Содержание в чугуна, %: Si	0,63	0,66	0,66	0,71	0,66
Mn	0,19	0,19	0,21	0,28	0,27
S	0,018	0,019	0,019	0,019	0,021
Ti	0,048	0,051	0,061	0,050	0,054
P	0,047	0,049	0,047	0,048	0,047
Cr	0,025	0,023	0,025	0,027	0,029
C	4,798	4,340	4,755	4,724	4,737
V	0,089	0,087	0,096	0,076	0,098
Содержание в шлаке, %: SiO ₂	39,30	38,87	38,55	39,05	38,20
Al ₂ O ₃	10,29	11,07	11,43	10,11	11,01
TiO ₂	0,67	0,72	0,79	0,70	0,85
CaO	39,88	38,60	38,68	39,33	38,65
MgO	7,31	7,52	7,54	7,37	8,14
S	0,65	0,64	0,67	0,70	0,72
FeO	0,24	0,25	0,24	0,25	0,24
MnO	0,20	0,21	0,21	0,28	0,32
CaO/SiO ₂	1,02	0,99	1,00	1,01	1,01

Повышение доли окатышей на 0,61 % на каждый 1 % увеличения расхода некондиционного агломерата в периоде V по сравнению с периодом IV сопровождалось уменьшением коэффициента сопротивления шихты движению газового потока в верхней части печи на 33 % при сохранении расхода дутья. Это позволило увеличить химическую степень использования газового потока согласно табл. 4.6. Степень использования водорода выросла от 45,7 до 47,2 % при увеличении степени использования CO от 42,1 до 42,9 %. В результате обеспечили уменьшение удельного расхода кокса от 451,4 до 450,0 кг/т чугуна при увеличении производительности доменной печи от 3300 до 3307 т/сутки.

Таким образом, проведением исследований на доменных печах №№ 9 и 6 ПАО «ММК» установили, что загрузка некондиционного агломерата в количестве

до 13,7 % от расхода железорудной части шихты с одновременным увеличением доли окатышей в количестве 0,5 % на каждый процент увеличения расхода некондиционного агломерата сопровождалось стабильной работой печи по газодинамике верха в условиях сохранения интенсивности по дутью.

4.2 Совместная загрузка некондиционного агломерата с агломератом повышенного качества фабрики № 5

На доменных печах № 9 и 10 ПАО «ММК» компенсировали отрицательное действие расхода некондиционного агломерата на газодинамику верхней части загрузкой агломерата повышенного качества фабрики № 5. Результаты исследований приведены в табл. 4.10-4.16.

На доменной печи № 9 ПАО «ММК» исследовали два периода. В базовом периоде (I) некондиционный агломерат в доменную печь не загружали. В опытном периоде (II) его загружали в количестве 11,7 % от расхода железорудной части шихты. Компенсировали негативное влияние его расхода на газодинамику верхней части печи загрузкой агломерата повышенного качества фабрики № 5. Его содержание в железорудной части шихте составило 4,3 %. То есть 0,37 % агломерата фабрики № 5 на каждый 1 % некондиционного агломерата.

В опытном периоде по сравнению с базовым уменьшилась доля окатышей в железорудной части шихты от 33,7 до 31,8 %, что действовало в направлении уменьшения эквивалентной крупности железорудного сырья (табл. 4.11) и как следствие к увеличению напряженности по силовому взаимодействию потоков шихты и газа в верхней части печи. Дополнительно уменьшало крупность железорудного сырья уменьшение эквивалентной крупности кондиционного агломерата с 10,2 до 9,6 мм.

В результате одновременного использования некондиционного агломерата в количестве 11,7 % от расхода железорудной части шихты и агломерата фабрики № 5 с долей 4,3 % от расхода железорудной части шихты увеличился коэффициент сопротивления шихты движению газового потока в верхней части

печи на 7,3 % при уменьшении интенсивности по дутью на 1,4%. При пересчете на 1 % некондиционного агломерата рост коэффициента сопротивления шихты составил 0,62 % в условиях уменьшения интенсивности по дутью на 0,12 %, что меньше на 0,36 и 0,07 % соответственно при загрузке 1 % некондиционного агломерата без компенсирования его негативного влияния загрузкой агломерата фабрики № 5.

Изменение технико-экономических показателей работы доменной печи № 9 было следующим: удельный расход кокса уменьшился с 406,8 до 394,8 кг/т чугуна, производительность уменьшилась с 4727 до 4724 т/сутки.

Таблица 4.10 – Основные технологические показатели работы доменных печей № 9 и 10

Наименование показателей	Содержание некондиционного агломерата в массе железорудной части шихты, %			
	0	11,7	0	18,0
Номер периода	I	II	III	IV
Доменная печь	9		10	
Длительность периода, сутки	6	6	14	14
Удельный расход кокса (сухого, скипового), кг/т чугуна:				
фактический	406,8	401,5	403,4	407,1
приведенный	406,8	394,8	403,4	404,1
Производительность, т/сутки:				
по фактическому количеству загруженных подач	4727	4616	5210	5174
приведенная	4727	4724	5210	5232
Расход, кг/т чугуна:				
коксовой фракции	-	-	3,48	-
сырьевых материалов	1650	1658	1699	1689
в том числе кварцита	8,3	15,9	3,8	4,6
Интенсивность хода				
по дутью, м ³ /м ³ минуту	1,980	1,952	2,105	2,083
по суммарному углероду т/м ³ сутки:	0,817	0,785	0,899	0,911
Рудная нагрузка, т/т	4,056	4,128	3,913	3,847
Содержание Fe в шихте, %	58,845	58,578	57,179	57,498
Вынос пыли, кг/т чугуна	8,5	11,0	11,4	10,7
кг/т шихты	5,0	6,8	6,7	6,2

Таблица 4.11 – Состав по видам и крупности железорудных материалов в исследуемые периоды

Наименование показателей	Содержание некондиционного агломерата в массе железорудной части шихты, %			
	0	11,7	0	18,0
Содержание окатышей от железорудной части шихты, %	33,7	31,8	25,2	26,3
в том числе:				
Лебединские	20,0	17,3	-	0,2
Михайловские	-	-	24,3	16,4
Соколовские неофлюсованные	13,7	14,5	0,7	9,5
Содержание агломерата фабрики № 5 от железорудной части шихты, %	-	4,3	-	18,0
Горячая прочность окатышей по LTD(+6,3), %:				
Лебединские	89,40	88,76	-	89,0
Михайловски	-	-	92,9	93,0
Соколовские неофлюсованные	71,80	71,80	71,1	71,0
Средневзвешенная	82,25	81,03	92,4	85,1
Горячая прочность агломерата по LTD (+6,3), %	58,6	55,4	55,1	54,9
Горячая прочность железорудных материалов по LTD (+6,3), %	64,2	62,7	64,5	62,8
Эквивалентная по поверхности крупность, мм:				
агломерата кондиционного	10,2	9,6	10,1	10,5
окатышей	11,7	11,7	13,4	12,8
железорудного сырья	10,3	10,1	10,9	11,1
Средневзвешенная крупность, мм:				
агломерата кондиционного	21,1	21,1	18,0	18,2
окатышей	13,5	13,6	16,3	15,5
железорудного сырья	16,4	16,9	17,6	17,5

На доменной печи № 10 ПАО «ММК» исследовали два периода. В базовом периоде (III) некондиционный агломерат в доменную печь не загружали. В опытном периоде (IV) его загружали в количестве 18 % от расхода железорудной части шихты. Компенсировали негативное влияние его расхода на газодинамику верхней части печи загрузкой агломерата повышенного качества фабрики № 5.

Его содержание в железорудной части шихте составило 18 %. То есть 1 % агломерата фабрики № 5 на каждый 1 % некондиционного агломерата.

Таблица 4.12 – Параметры колошниковога газа доменных печей № 9 и 10

Наименование показателей	Содержание некондиционного агломерата в массе железорудной части шихты, %			
	0	11,7	0	18,0
Состав колошниковога газа, %:				
CO ₂	18,75	18,04	19,25	19,03
CO	24,75	24,48	25,49	25,64
H ₂	8,525	8,70	9,33	9,38
Степень использования, % CO	43,1	42,5	43,0	42,6
H ₂	48,1	48,4	46,5	47,6
Температура газа, °С:				
в газоотводах	211	211	172	186
на периферии под газоотводами	242	238	167	176
на периферии в шахте	404	438	377	427
Градиент температуры газа, °С:				
в газоотводах	90	102	6	5
на периферии под газоотводами	221	214	94	87
на периферии в шахте	397	359	255	271
Давление колошниковога газа, кПа	141,7	141,6	147,9	149,3
Уровень засыпи фактический, м	1,01	1,01	1,73	1,57
Температура газа по радиусу, °С, на расстоянии от кладки, м:				
0,97	201	198	180	219
1,37	208	191	163	211
1,87	96	95	150	167
2,37	161	148	139	150
3,22	147	201	202	220
4,3	266	266	364	304
Температура газа по радиусу, °С:				
на периферии (Т _{пер})	201	198	180	219
в рудном гребне (Т _{гр})	161	148	137	150
в центре печи (Т _ц)	266	266	368	304
T _{пер} /T _{гр}	1,25	1,33	1,31	1,46
T _{пер} /T _ц	0,76	0,74	0,56	0,80
T _ц /T _{гр}	1,66	1,80	2,74	2,05
T _{пер} -T _{кол} , °С	193	227	205	241

Таблица 4.13 – Показатели качества шихтовых материалов
доменных печей № 9 и 6

Наименование показателей	Содержание некондиционного агломерата в массе железорудной части шихты, %			
	0	11,7	0	18,0
Номер периода	I	II	III	IV
Содержание фракции 0-5 мм в кондиционном агломерате	8,57	8,45	7,36	6,63
Содержание золы в коксе	12,07	12,04	11,72	11,87
Холодная прочность кокса по показателям, %: M10	7,4	7,3	8,2	8,3
	M25	88,1	88,0	87,3
Горячая прочность кокса по CSR, %	27,30	30,06	39,25	39,93
Реакционная способность кокса (CRI) , %	44,90	43,66	39,08	38,88

Таблица 4.14 – Параметры дутья на доменных печах № 9 и 10 в исследуемые периоды

Наименование показателей	Содержание некондиционного агломерата в массе железорудной части шихты, %			
	0	11,7	0	18,0
Номер периода	I	II	III	IV
Расход: дутья, м ³ /мин	3988	3932	4239	4195
м ³ /т чугуна	1215	1227	1172	1168
природного газа, м ³ /т чугуна	115,4	116,6	129,5	132,2
тыс. м ³ /час	24,1	23,7	29,8	29,5
Степень открытия малого снорта, %	22	15	12,6	13,7
Давление горячего дутья, кПа	269	272	289	292
Температура дутья, °С	1053	1053	1060	1069
Расход водяного пара, г/м ³	0	0	0,021	0,011
Содержание кислорода, %	26,1	25,7	27,6	27,8
Теоретическая температура горения, °С	1904	1934	1988	2009

В опытном периоде (IV) по сравнению с базовым (III) увеличилась доля неофлюсованных окатышей в железорудной части шихты от 25,2 до 26,3 %, что наряду с увеличением крупности кондиционного агломерата с 10,1 до 10,5 мм

действовало в направлении увеличения эквивалентной крупности железорудного сырья с 10,9 до 11,1 мм (табл. 4.11).

Таблица 4.15 – Показатели газодинамического режима работы доменных печей № 9 и 10

Наименование показателей	Содержание некондиционного агломерата в массе железорудной части шихты, %			
	0	11,7	0	18,0
Номер периода	I	II	III	IV
Коэффициент сопротивления шихты движению газов:				
на колошнике	0,57	0,61	0,20	0,20
в горне	6,44	6,76	4,57	4,73
общее	4,81	5,07	2,97	3,08
Выход фурменного газа, м ³ /т чугуна	1821	1846	1583	1574

Таблица 4.16 – Результаты химического анализа продуктов плавки доменных печей № 9 и 10

Наименование показателей	Содержание некондиционного агломерата в массе железорудной части шихты, %			
	0	11,7	0	18,0
Содержание в чугуне, %:				
Si	0,68	0,80	0,69	0,68
Mn	0,19	0,20	0,35	0,34
S	0,021	0,018	0,018	0,019
Ti	0,048	0,055	0,046	0,052
P	0,050	0,058	0,055	0,057
Cr	0,025	0,023	0,023	0,024
C	4,825	4,726	4,762	4,751
V	0,071	0,072	0,073	0,081
Содержание в шлаке, %:				
SiO ₂	39,00	38,88	39,40	38,80
Al ₂ O ₃	11,13	10,67	10,37	10,86
TiO ₂	0,63	0,60	0,68	0,73
CaO	38,68	39,47	39,05	38,53
MgO	7,68	7,65	7,64	7,58
S	0,66	0,68	0,66	0,65
FeO	0,25	0,25	0,25	0,26
MnO	0,20	0,17	0,34	0,35
CaO/SiO ₂	0,99	1,02	0,99	0,99

Из сравнения периодов III и IV работы доменной печи № 10 следует, что совместный ввод некондиционного агломерата с агломератом повышенного качества фабрики № 5 обеспечил сохранение газодинамического режима ее работы в верхней части печи, на что указывает сохранение коэффициента сопротивления шихты движению газового потока согласно табл. 4.15 при незначительном уменьшении выхода фурменного газа от 1583 до 1574 м³/т чугуна. В доменной печи в опытный период создавались условия для эффективного использования природного газа. Степень использования водорода увеличилась от 46,5 до 47,6 % в периоде IV по сравнению с периодом III.

Совместное использование агломерата некондиционного и повышенного качества приводило к смещению движения газового потока по периферии, на что указывает увеличение разности температур на периферии и в колошниковом пространстве в периодах II и IV по сравнению с периодами соответственно I и III на 35 °С (табл. 4.12). Увеличение отношения $T_{пер}/T_{гр}$ в периодах II и IV по сравнению с периодами соответственно I и III в среднем на 0,115 свидетельствует о том, что крупная фракция агломерата перетекала на периферию при размещении мелкой фракции агломерата в зоне рудного гребня.

В результате совместной загрузки некондиционного агломерата в смеси агломератом повышенного качества обеспечивало повышение производительности с 5210 до 5232 т/сутки при увеличении удельного расхода кокса с 403,4 до 404,1 кг/т чугуна.

Таким образом, проведением исследований на доменной печи № 9 ПАО «ММК» установили, что загрузка некондиционного агломерата в количестве до 11,7 % от расхода железорудной части шихты с одновременным увеличением доли агломерата фабрики № 5 в количестве 0,37 % на каждый процент увеличения расхода некондиционного агломерата сопровождалось увеличением коэффициента сопротивления шихты движению газового потока в верхней части печи на 0,62 % в условиях уменьшения интенсивности по дутью на 0,12 %, что меньше на 0,36 и 0,07 % соответственно при загрузке 1 % некондиционного

агломерата без компенсирования его негативного влияния загрузкой агломерата фабрики № 5.

Проведением исследований на доменной печи № 10 ПАО «ММК» установили, что загрузка некондиционного агломерата в количестве до 18 % от расхода железорудной части шихты с одновременным увеличением доли агломерата фабрики № 5 в количестве 1 % на каждый процент увеличения расхода некондиционного агломерата обеспечило сохранение коэффициента сопротивления шихты движению газового потока в верхней части печи в условиях уменьшения выхода фурменного газа на 0,57 %.

Для стабильной работы печи по газодинамике верха в условиях сохранения интенсивности по дутью целесообразна загрузка агломерата фабрики № 5 в количестве 0,5-1 % на каждый процент увеличения расхода некондиционного агломерата.

4.3 Компенсация негативного влияния некондиционного агломерата загрузкой добавочных материалов: коксовая фракция, марганцевая руда

На доменных печах №№ 4, 6 и 10 ПАО «ММК» исследовали одновременную загрузку некондиционного агломерата совместно с добавочными материалами: коксовая фракция и марганцевая руда Ниязгуловского месторождения [124-127].

На доменной печи № 4 ПАО «ММК» исследовали загрузку некондиционного агломерата в смеси с коксовой фракцией. Результаты работы в исследуемые периоды приведены в табл. 4.17-4.24. Исследовали два периода. В базовом периоде (I) некондиционный агломерат не загружали. В опытном периоде (II) его загружали в смеси с коксовой фракцией в количестве соответственно 6,7 % от расхода ЖРС и 5 кг/т чугуна. Доля окатышей в периоде II по сравнению с периодом I уменьшилось от 40,5 до 35,9 % (табл. 4.17).

Таблица 4.17 – Состав по видам и крупности железорудных материалов в исследуемые периоды

Наименование показателей	Содержание некондиционного агломерата в массе железорудной части шихты, %					
	0	6,7	0	7,4	0	11,9
Номер периода	I	II	III	IV	V	VI
Доменная печь	4		6		10	
Содержание окатышей от железорудной части шихты, %						
в том числе:	40,5	35,9	34,4	31,8	36,1	32,8
Качканарские	4,8	2,4	-	-	-	-
Михайловские	10,2	15,0	15,0	14,0	27,9	26,6
Соколовские						
неофлюсованные	25,5	18,5	19,4	17,8	8,3	6,1
Эквивалентная по поверхности крупность, мм:						
агломерата	10,12	9,91	10,05	10,15	9,92	10,26
окатышей	11,58	11,42	13,85	13,16	14,24	14,25
железорудного сырья	10,62	10,36	11,28	11,20	11,48	11,56
Средневзвешенная крупность, мм:						
агломерата	18,76	18,45	17,62	17,89	18,05	18,17
окатышей	13,40	13,23	16,56	16,39	16,68	16,66
железорудного сырья	16,42	16,41	17,28	17,37	17,56	17,58

Качество шихтовых материалов в опытном периоде по сравнению с базовым улучшилось. Содержание фракции 0-5 мм в агломерате без учета некондиционного агломерата уменьшилось от 9,02 до 8,71 %. Истираемость кокса уменьшилась по показателю M10 от 8,25 до 7,62 % (табл. 4.18).

Совместная загрузка коксовой фракции (5 кг/т чугуна, табл. 4.19) с некондиционным агломератом (6,7 % от массы железорудного сырья) в периоде II по сравнению с периодом I сопровождалось сохранением величины коэффициента сопротивления шихты движению газового потока в верхней части в условиях сохранения выхода фурменного газа согласно табл. 4.20.

Таблица 4.18 – Показатели качества шихтовых материалов печей в исследуемые периоды

Наименование показателей	Содержание некондиционного агломерата в массе железорудной части шихты, %					
	0	6,7	0	7,4	0	11,9
Номер периода	I	II	III	IV	V	VI
Содержание фракции 0-5 мм в кондиционном агломерате, %	9,02	8,71	8,41	8,41	9,49	8,90
Содержание золы в коксе, %	12,01	12,18	11,99	12,03	12,65	12,66
Холодная прочность кокса по показателям, %: M10 M25	8,25	7,62	7,5	7,8	7,42	7,44
	86,66	87,97	86,0	85,8	89,98	89,50
Горячая прочность кокса по CSR, %	35,28	32,12	35,6	37,0	38,4	38,4
Реакционная способность кокса (CRI) , %	38,47	39,88	39,7	40,7	37,0	37,0

В периоде II в условиях использования коксовой фракции в смеси с железорудным сырьем дренаж жидких продуктов плавки через слой углеродного материала в нижней части печи не ухудшился, на что указывают показатели, приведенные в табл. 4.21.

Рациональная эквивалентная по поверхности крупность железорудного сырья в опытном периоде по сравнению с базовым позволила увеличить расход природного газа от 17,3 до 19,9 тыс. м³/час (табл. 4.22.) в условиях повышения эффективности его использования. Химическая степень использования водорода увеличилась от 45,8 до 46,3 % (табл. 4.23), что обеспечило снижение удельного расхода кокса 425,6 до 422,4 кг/т чугуна.

Анализ работы доменной печи № 4 ПАО «ММК» показывает, что загрузка коксовой фракцией в количестве 5 кг/т чугуна в смеси с некондиционным агломератом с долей 6,7 % от расхода железорудной части шихты частично компенсировало негативное влияние некондиционного агломерата на газодинамику верхней части печи. Это позволило сохранить производительность доменной печи при уменьшении удельного расхода кокса согласно табл. 4.24. Эффективное использование коксовой фракции способствовало сокращению потребления кокса от 425,6 до 420,5 кг/т чугуна (табл. 4.19).

Таблица 4.19 – Основные технологические показатели работы печей в исследуемые периоды

Наименование показателей	Содержание некондиционного агломерата в массе железорудной части шихты, %					
	0	6,7	0	7,4	0	11,9
Номер периода	I	II	III	IV	V	VI
Доменная печь	4		6		10	
Длительность периода, сутки	7	7	8	8	7	7
Удельный расход кокса (сухого, скипового), кг/т чугуна:						
фактический	425,6	422,4	434,7	451,6	422,6	417,3
приведенный	425,6	420,5	434,7	448,4	422,6	417,8
Производительность, т/сутки:						
по фактическому количеству	3785	3896	3435	3446	5303	5300
загруженных подач						
приведенная	3785	3787	3435	3435	5303	5311
Расход, кг/т чугуна:						
коксовой фракции	-	5,0	-	-	10,1	11,0
сырьевых материалов	1660	1666	1655	1688	1667	1688
в том числе						
кварцита	7,6	12,8	11,2	7,2	-	-
марганцевой руды	-	-	6,8	24,7	4,5	23,5
Интенсивность хода по дутью, м ³ /м ³ минуту	2,027	1,993	1,968	2,042	2,291	2,292
по суммарному углероду т/м ³ сутки:	1,004	1,046	0,937	0,974	1,406	1,356
Рудная нагрузка, т/т	3,900	3,943	3,808	3,738	3,969	4,071
Содержание Fe в шихте, %	58,443	58,295	58,665	57,515	58,24	57,54
Вынос пыли, кг/т чугуна	15,6	20,8	10,8	10,0	11,83	12,67

Таблица 4.20 – Показатели газодинамического режима работы печей в исследуемые периоды

Наименование показателей	Содержание некондиционного агломерата в массе железорудной части шихты, %					
	0	6,7	0	7,4	0	11,9
Номер периода	I	II	III	IV	V	VI
Коэффициент сопротивления шихты движению газов:						
на колошнике	0,30	0,30	0,14	0,15	0,25	0,25
в горне	7,26	7,42	13,58	12,89	6,82	7,12
общее	5,04	5,07	8,57	8,09	4,59	4,74
Выход фурменного газа, м ³ /мин	3700	3708	3641	3819	6155	6145

Таблица 4.23 – Параметры колошникового газа доменных печей в исследуемые периоды

Наименование показателей	Содержание некондиционного агломерата в массе железорудной части шихты, %					
	0	6,7	0	7,4	0	11,9
Номер периода	I	II	III	IV	V	VI
Состав колошникового газа, %:						
CO ₂	20,58	21,05	19,73	20,05	18,4	17,9
CO	23,54	24,22	26,07	26,90	24,9	25,0
H ₂	8,59	9,12	9,45	10,10	9,2	9,1
Степень использования, % CO	46,7	46,5	43,1	42,7	42,5	41,7
H ₂	45,8	46,3	47,1	46,0	50,8	50,2
Температура газа, °С:						
в газоотводах						
на периферии под	205	215	137	156	208	219
газоотводами	118	160	119	130	229	231
на периферии в шахте	399	365	265	268	608	620
Градиент температуры газа, °С:						
в газоотводах						
на периферии под	31,4	26,8	11	12	19	16
газоотводами	72,6	69,0	17	23	133	151
на периферии в шахте	321	244	197	153	177	180
Давление колошникового газа, кПа	140,8	140,8	142,4	142,0	140,4	139,3
Уровень засыпи фактический, м	2,49	3,04	2,35	2,38	0,98	1,07
Температура газа по радиусу, °С, на расстоянии от кладки, м:						
0,97	170	193	144	158	280	267
1,37	175	186	139	151	292	275
1,87	145	184	125	137	317	293
2,37	145	178	116	128	371	337
3,22	121	161	136	170	472	421
4,3	206	172	171	190	533	486
Температура газа по радиусу, °С:						
на периферии (Т _{пер})	170	193	144	158	280	267
в рудном гребне (Т _{гр})	145	178	116	128	371	337
в центре печи (Т _ц)	206	172	171	190	533	486
Т _{пер} /Т _{гр}	1,17	1,08	1,25	1,24	0,75	0,79
Т _{пер} /Т _ц	0,82	1,12	0,85	0,83	0,52	0,55
Т _ц /Т _{гр}	1,42	0,97	1,47	1,49	1,44	1,44
Т _{пер} -Т _{кол} , °С	194	149	131	115	72	48

Таблица 4.24 – Результаты химического анализа продуктов плавки печей в исследуемые периоды

Наименование показателей	Содержание некондиционного агломерата в массе железорудной части шихты, %					
	0	6,7	0	7,4	0	11,9
Номер периода	I	II	III	IV	V	VI
Содержание в чугуне, %: Si	0,65	0,73	0,75	0,79	0,67	0,70
Mn	0,29	0,27	0,28	0,46	0,28	0,50
S	0,018	0,019	0,020	0,022	0,017	0,019
Ti	0,080	0,070	0,059	0,059	0,065	0,069
P	0,045	0,048	0,060	0,055	0,053	0,055
Cr	0,032	0,031	0,027	0,019	0,031	0,033
C	4,758	4,732	4,607	4,560	4,805	4,793
V	0,109	0,108	0,099	0,087	0,091	0,098
Содержание в шлаке, %: SiO ₂	38,29	38,36	38,57	39,04	38,3	38,5
Al ₂ O ₃	11,07	10,92	11,04	11,20	10,7	10,8
TiO ₂	1,10	0,88	0,78	0,74	0,85	0,88
CaO	38,31	38,58	38,37	37,79	38,25	38,18
MgO	8,33	8,19	7,93	7,45	8,46	8,08
S	0,72	0,73	0,65	0,64	0,66	0,68
FeO	0,22	0,22	0,27	0,24	0,25	0,25
MnO	0,28	0,27	0,31	0,43	0,25	0,40
CaO/SiO ₂	1,00	1,01	0,99	0,97	0,998	0,990

В периоде IV по сравнению с периодом III увеличили ее расход с 6,8 до 24,7 кг/т чугуна в условиях загрузки некондиционного агломерата в количестве 7,4 % от массы железорудного сырья. Содержание фракции 0-5 мм в кондиционном агломерате в исследуемые периоды не изменилась (табл. 4.18). Доля окатышей уменьшилась от 34,4 до 31,8 %, что сопровождалось уменьшением эквивалентная по поверхности крупность от 11,28 до 11,20 мм (табл. 4.17).

В периоде IV по сравнению с периодом III увеличилось содержание марганца в чугуне и шлаке соответственно от 0,28 до 0,46 % и 0,31 до 0,43 % (табл. 4.24). Результаты работы доменной печи № 6 в исследуемые периоды приведены в табл. 4.19-4.24. Загрузка марганцевой руды в количестве 24,7 кг/т чугуна частично компенсировало отрицательное влияние некондиционного агломерата с долей 6,7 % от массы ЖРС на газодинамику процесса. В периоде IV по сравнению с периодом III коэффициент сопротивления шихты движению

газового потока в верхней части печи увеличился незначительно – на 0,69 % (табл. 4.20) в условиях увеличения дутья и выхода фурменного газа в соответствии с табл. 4.20 и 4.22.

Загрузка марганцевой руды оказывала положительное влияние на дренаж продуктов доменной плавки через углеродистую насадку в горне печи. В периоде IV по сравнению с периодом III уменьшилась вязкость шлака, снизилось количество шлака, остающегося в горне после выпуска согласно табл. 4.21.

Применение марганцевой руды снижало содержание железа в шихте с 58,665 до 57,515 %. Однако, снижение взаимного газодинамического напряжения между шихтой и газовым потоком в верхней части печи позволило увеличить интенсивность по дутью от 1,968 до 2,042 м³/м³ минуту (3,76 %), что обеспечило сохранение производительности печи в базовом и опытном периодах на уровне 3435 т/сутки.

Ввиду, того что доменная печь работала с верхней лимитирующей по газодинамике зоной и процессы дренажа продуктов плавки через слой кокса не ограничивали производительность печи, то промывка горна марганцевой рудой сопровождалась повышением удельного расхода кокса от 434,7 до 448,4 кг/т чугуна частично за счет протекания реакции прямого восстановления оксидов марганца углеродом кокса, частично за счет избыточного его потребления, на что указывает увеличение содержание Si в чугуне от 0,75 до 0,79 % (табл. 4.24) в периоде IV по сравнению с периодом III.

Таким образом, загрузка марганцевой руды в количестве 3,34 кг на 1 % некондиционного агломерата на доменной печи, работающей с определяющей по газодинамике зоной в верхней части печи, компенсировало отрицательное влияние некондиционного агломерата на взаимное сопротивление потоков шихты и газа в шахте печи в условиях увеличения удельного расхода кокса за счет протекания реакции прямого восстановления между углеродом кокса и оксидами марганца.

На доменной печи № 10 ПАО «ММК» объемом 2014 м³, в периоды V-VI, работающей с нижней лимитирующей по газодинамике зоной для улучшения

условий фильтрации чугуна и шлака через углеродную насадку загружали марганцевую руду Ниязгуловского месторождения. В периоде VI по сравнению с периодом V увеличили ее расход с 4,5 до 23,5 кг/т чугуна в условиях загрузки некондиционного агломерата в количестве 11,9 % от массы железорудного сырья. Содержание фракции 0-5 мм в кондиционном агломерате в исследуемых периодах уменьшилось на 0,59 % абс. (табл. 4.18), что при общем увеличении эквивалентной крупности агломерата с 9,92 до 10,26 мм обеспечило увеличение эквивалентной крупности железорудного сырья от 11,48 до 11,56, несмотря на уменьшение доли окатышей от 36,1 до 32,8 % (табл. 4.17).

В периоде VI по сравнению с периодом V увеличилось содержание марганца в чугуне от 0,28 до 0,50 % и шлаке 0,25 до 0,40 % (табл. 4.24). Результаты работы доменной печи № 10 в исследуемые периоды приведены в табл. 4.19-4.24. Загрузка марганцевой руды в количестве 23,5 кг/т чугуна компенсировало отрицательное влияние некондиционного агломерата с долей 11,9 % от ЖРС на газодинамику процесса. В периоде VI по сравнению с периодом V коэффициент сопротивления шихты движению газового потока в верхней части печи остался неизменным (табл. 4.20) в условиях сохранения интенсивности по дутью и природному газу (табл. 4.22).

Загрузка марганцевой руды оказывала положительное влияние на дренаж продуктов доменной плавки через углеродистую насадку в горне печи. В периоде VI по сравнению с периодом V уменьшилась вязкость шлака, снизилось количество шлака, остающегося в горне после выпуска согласно табл. 4.21.

Применение марганцевой руды снижало содержание железа в шихте с 58,242 до 57,537 %. Однако, улучшения условий движения чугуна и шлака через слой кокса в нижней части печи за счет улучшения подвижности шлака от 0,65 до 0,60 Па·с, увеличения нагрева жидких продуктов плавки (содержание Si в периоде VI по сравнению с периодом V увеличилось от 0,67 до 0,70 %, табл. 4.24) обеспечило увеличение производительности печи от 5303 до 5311 т/сутки при снижении удельного расхода кокса от 422,6 до 417,8 кг/т чугуна.

В результате, загрузка марганцевой руды в количестве 1,98 кг на 1 % некондиционного агломерата на доменной печи, работающей с лимитированием по взаимному сопротивлению потоков шихты и газа в нижней части печи, компенсировало отрицательное влияние некондиционного агломерата на газодинамику верха печи в условиях увеличения производительности и снижения удельного расхода кокса за счет эффективной промывки горна от спели и мелочи кокса.

Таким образом, для эффективного использования некондиционного агломерата совместно с марганцевой рудой целесообразно совместную загрузку осуществлять в печи, работающие с нижней лимитирующей зоной по силовому взаимодействию потоков шихты и газа.

4.4 Загрузка некондиционного агломерата совместно с агломератом текущего производства и окатышами в локальные зоны по сечению доменной печи № 4 ПАО «ММК»

На доменной печи № 4 ПАО «ММК» исследовали режимы загрузки некондиционного агломерата совместно с агломератом текущего производства и окатышами в локальные зоны по сечению колошника. Матрица загрузки шихтовых материалов в колошниковое пространство печи в исследуемые периоды приведена в табл. 4.25 [130-134].

Из табл. 4.25 следует, что в исследуемые периоды применяли двухскиповую загрузку шихтовых материалов в колошниковое пространство печи. Загрузку железорудных материалов производили с шести позиций углового положения лотка. В периоде I некондиционный агломерат загружали в первый и второй рудные скипы. Последовательность загрузки компонентов шихты во второй скип дублировала таковую в первом. В результате в бункере БЗУ некондиционный агломерат размещали в двух местах: в слое агломерата в нижней части бункера и в середине слоя железорудного сырья. В периоде II некондиционный агломерат загружали в первый рудный скип, содержимое которого располагалось в нижней

части бункера БЗУ. В периоде III некондиционный агломерат размещали во втором рудном скипе, содержимое которого поступало в бункер БЗУ после первого рудного скипа. Таким образом, некондиционный агломерат располагался в бункере в середине слоя железорудного сырья.

Таблица 4.25 – Матрица загрузки доменной печи № 4 ПАО «ММК»
в исследуемые периоды

№ п/п	Содержание скипа	Станции лотка										
		11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
1	К			1	1	1	1	1	1			
2	Р		1	1	1	1	1	1				
3	К			1	1	1	2	1				
4	К									1	1	
5	Р		1	1	1	1	1	1				
6	К			1	1	1	1		1	1		
7	Р			1	2	2	1					
8	К		1	1	1	1	1	1				
9	Р	1	1	1	1	1	1					
10	К				1	1	1	2	1			
11	К			1	1							
12	Р		1	1	1	1	1	1				
13	К			1	1	1	1		1	1		
14	Р		1	1	1	1	1	1				

Анализом результатов физического моделирования фактических режимов загрузки некондиционного агломерата в смеси с железорудным сырьем в колошниковое пространство печи применительно к действующей матрице загрузки (табл. 4.25) оценили распределение некондиционного агломерата по станциям углового положения лотка в исследуемые периоды (табл. 4.26-4.27).

Из таблиц 4.26-4.27 следует, что в периоде I распределение некондиционного агломерата по радиусу колошника доменной печи № 4 было следующим: на периферию поступало 24 % некондиционного агломерата от общего его расхода, в промежуточную зону между периферией и зоной рудного гребня – 40 % и в зону рудного гребня – 36 % (табл. 4.27).

Таблица 4.26 – Распределение некондиционного агломерата по станциям углового положения лотка в исследуемые периоды

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

Таблица 4.27 – Распределение некондиционного агломерата по зонам колошника в исследуемые периоды

Номер периода	Режим загрузки некондиционного агломерата	Доля некондиционного агломерата (%) поступающего со станции углового положения в соответствующие зоны		
		Периферия (станции лотка 10-11)	Промежуточная между периферией и рудным гребнем (станции лотка 8-9)	Рудный гребень (станции лотка 5-7)
I	1-ый и 2-ой рудные скипы	24	40	36
II	1-й рудный скип	27	28	45
III	2-й рудный скип	8	42	50

В периоде II режим загрузки некондиционного агломерата в первый рудный скип обеспечивал высокую долю его в периферийной части печи, равную 27 %. Максимальное содержание, равное 45 %, загружали в зону рудного гребня.

В периоде III размещение некондиционного агломерата в середине слоя железорудного сырья сопровождалось следующим распределением его по радиусу печи: на периферию загружали 8 % некондиционного агломерата от его расхода, в промежуточную зону между периферией и зоной рудного гребня поступало 42 % некондиционного агломерата, в зону рудного гребня – 50 % (табл. 4.27).

Коксовую фракцию во всех исследуемых периодах загружали в первый и второй рудные скипы. В бункере БЗУ коксовая фракция располагалась в середине слоя железорудного сырья и над ним в верхней части бункера. Такое размещение

коксовой фракции обеспечивало ее распределение по радиусу печи согласно табл. 4.28. Максимальное количество коксовой фракции поступало в зону рудного гребня, равное 46 % и в промежуточную зону между периферией и рудным гребнем – 43 %. В пристеночную зону загружали 11 % коксовой фракции.

В периоде I содержание некондиционного агломерата в шихте составляло 6,5 % от расхода ЖРС, расход коксовой фракции составил 19,9 кг/т чугуна (табл. 4.29), доля окатышей - 34,9 %. В периоде II по сравнению с периодом I содержание некондиционного агломерата увеличилось от 6,5 до 7,8 % при снижении расхода коксовой фракции от 19,9 до 17,3 (табл. 4.29) и уменьшении доли окатышей от 34,9 до 31,2 % (табл. 4.30). В периоде III по сравнению с периодом II содержание некондиционного агломерата уменьшилось от 7,8 до 7,3 % при уменьшении расхода коксовой фракции от 17,3 до 17,1 кг/т чугуна и увеличении доли окатышей от 31,2 до 37 %.

Таблица 4.28 – Распределение коксовой фракции по зонам колошника в исследуемые периоды

Номер периода	Режим загрузки коксовой фракции	Доля коксовой фракции (%) поступающего со станции углового положения в соответствующие зоны		
		Периферия (станции лотка 10-11)	Промежуточная между периферией и рудным гребнем (станции лотка 8-9)	Рудный гребень (станции лотка 5-7)
I-III	1-ый и 2-ой рудные скипы	11	43	46

Состав шихтовых материалов и их качество в холодном состоянии обеспечивали схожую эквивалентную по поверхности крупность железорудных материалов в смеси с коксовой фракцией в периодах I и II, равную соответственно 10,19 и 10,14 мм. При этом горячая прочность железорудного сырья в периоде II по сравнению с периодом I уменьшилась от 68,6 до 66,5 % (табл. 4.30).

В периоде III по сравнению с периодом II эквивалентная по поверхности крупность железорудного сырья в смеси с коксовой фракцией увеличилась от

10,14 до 10,5 мм, несмотря на уменьшение расхода коксовой фракции от 17,3 до 17,1 кг/т чугуна. Это является следствием увеличения крупности агломерата, при увеличении доли окатышей в шихте, крупность которых больше чем у агломерата согласно табл. 4.30. При этом, необходимо учесть что коксовая фракция располагается не равномерно по радиусу колошника и преимущественно разрыхляет локальные зоны рудного гребня и промежуточную зону между рудным гребнем и периферией, что в условиях существующего распределения компонентов шихты, в том числе некондиционного агломерата, усиливает действие увеличенного расхода коксовой фракции в периодах I и II по сравнению с периодом III несмотря на пониженную средневзвешенную крупность ЖРС в смеси с фракцией.

Таблица 4.29 – Основные технологические показатели работы доменной печи № 4 в периоды I-III

Наименование показателей	Содержание некондиционного агломерата в массе железорудной части шихты, %		
	6,5	7,8	7,3
Номер периода	I	II	III
Длительность периода, сутки	2	3	3
Удельный расход кокса (сухого, скипового), кг/т чугуна:			
фактический	426,2	425,5	432,1
приведенный	426,2	423,4	422,6
Производительность, т/сутки:			
по фактическому количеству загруженных подач	3462	3484	3698
приведенная	3462	3449	3509
Расход, кг/т чугуна:			
сырьевых материалов	1656	1642	1637
в том числе кварцита	10,5	11,2	6,1
коксовой фракции	19,9	17,3	17,1
Интенсивность хода:			
по дутью, м ³ /м ³ минуту	1,980	1,970	1,934
по суммарному углероду т/м ³ сутки	0,915	0,909	1,010
Рудная нагрузка, т/т	3,967	3,881	3,788
Содержание Fe в шихте, %	58,650	59,123	59,320
Вынос пыли, кг/т чугуна	5,5	8,0	7,0

Таблица 4.30 – Состав по видам и крупности железорудных материалов в периоды I-III

Наименование показателей	Содержание некондиционного агломерата в массе железорудной части шихты, %		
	6,5	7,8	7,3
Номер периода	I	II	III
Содержание окатышей от железорудной части шихты, %	34,9	31,2	37,0
в том числе:			
Качканарские	-	-	2,7
Лебединские	21,4	31,2	34,3
Михайловские	13,5	-	-
Горячая прочность окатышей по LTD(+6,3), %:			
Качканарские	78,40	78,40	78,40
Лебединские	88,60	88,60	88,80
Михайловские	92,80	92,80	93,53
Средневзвешенная	90,22	88,60	88,04
Горячая прочность агломерата по LTD(+6.3), %	57,64	56,95	58,60
Горячая прочность железорудных материалов по LTD(+6,3), %	68,61	66,48	69,26
Эквивалентная по поверхности крупность, мм:			
агломерата (с учетом некондиционного)	9,49	9,48	9,69
окатышей	10,9	11,02	11,00
железорудного сырья	9,92	9,90	10,14
Средневзвешенная крупность, мм:			
агломерата (с учетом некондиционного)	17,94	18,22	18,20
окатышей	12,9	13,16	13,13
железорудного сырья	16,06	16,53	16,25
Крупность железорудного сырья в смеси с коксовой фракцией и некондиционным агломератом, мм:			
эквивалентная по поверхности	10,19	10,14	10,50
средневзвешенная	16,25	16,70	16,85

Результаты работы доменной печи № 4 в исследуемые периоды приведены в табл. 4.31-4.37.

Таблица 4.31 – Параметры колошниковога газа доменной печи № 4
в периоды I-III

Наименование показателей	Содержание некондиционного агломерата в массе железорудной части шихты, %		
	6,5	7,8	7,3
Номер периода	I	II	III
Состав колошниковога газа, %:			
CO ₂	19,60	19,17	18,08
CO	24,50	26,20	26,74
H ₂	9,10	9,50	9,40
Степень использования, % CO	44,5	42,2	40,9
H ₂	44,5	45,3	46,1
Температура газа, °С:			
в газоотводах	196	141	153
на периферии под газоотводами	157	117	114
на периферии в шахте	522	406	392
Градиент температуры газа, °С:			
в газоотводах	31	30	25,3
на периферии под газоотводами	229	76	156
на периферии в шахте	522	406	169
Давление колошниковога газа, кПа	140,5	140,7	137,6
Уровень засыпи фактический, м	2,38	2,48	3,05
Температура газа по радиусу, °С, на расстоянии от кладки, м:			
0,97	217	291	187
1,37	219	280	184
1,87	202	270	183
2,37	184	261	174
3,22	125	225	128
4,3	151	185	91
Температура газа по радиусу, °С:			
на периферии (Т _{пер})	245	167	187
в рудном гребне (Т _{гр})	185	144	174
в центре печи (Т _ц)	129	87	91
T _{пер} /T _{гр}	1,32	1,16	1,08
T _{пер} /T _ц	1,90	1,92	2,04
T _ц /T _{гр}	0,69	0,61	0,53
T _{пер} -T _{кол} , °С	272	222	240

Таблица 4.32 – Температура холодильников шахты доменной печи № 4
в периоды I-III

Наименование показателей	Содержание некондиционного агломерата в массе железорудной части шихты, %		
	6,5	7,8	7,3
Номер периода	I	II	III
Температура холодильников шахты, °С			
1-го ряда	60,1	56,8	52,1
3-го ряда	61,1	54,9	52,7
4-го ряда	53,1	43,1	44,1
6-го ряда	-	-	-
Среднеарифметическая температура	58,1	51,6	49,6

Таблица 4.33 – Показатели газодинамического режима работы доменной печи № 4

Наименование показателей	Содержание некондиционного агломерата в массе железорудной части шихты, %		
	6,5	7,8	7,3
Номер периода	I	II	III
Коэффициент сопротивления шихты движению газов:			
на колошнике	5,32	5,55	5,34
в горне	13,22	12,76	12,66
общее	8,85	9,01	8,66
Выход фурменного газа, м ³ /мин	3624	3671	3608

В периоде II по сравнению с периодом I уменьшился градиент температур между периферийным и колошниковым газом от 272 до 222 °С (табл. 4.31). Это указывает на уменьшение количества газов проходящих через периферию, что является результатом уменьшения доли окатышей от 34,9 до 31,2 % при увеличении доли некондиционного агломерата поступающего со станций 10-11 углового положения лотка от 24 до 27 %.

Уменьшение количества газа, проходящего через периферию, с одновременным увеличением содержания мелкой фракции агломерата в

пристеночной зоне печи уменьшало температуру холодильников шахты от 58,1 до 51,6 °С (табл. 4.32). Из этого следует, что загрузка мелких фракций агломерата в пристеночную зону колошника целесообразна в условиях разгара кладки печи.

Таблица 4.34 – Параметры дутья на доменной печи № 4 в периоды I-III

Наименование показателей	Содержание некондиционного агломерата в массе железорудной части шихты, %		
	6,5	7,8	7,3
Номер периода	I	II	III
Расход: дутья, м ³ /мин	2712	2698	2650
м ³ /т чугуна	1128	1115	1033
природного газа, м ³ /т чугуна	124,5	123,4	131,5
тыс. м ³ /час	17,8	17,6	19,8
Степень открытия малого снорта, %	34	25	13
Давление горячего дутья, кПа	260	261	253
Температура дутья, °С	1181	1188	1184
Расход водяного пара, г/м ³	0,61	6,79	1,05
Содержание кислорода, %	27,9	28,1	29,5
Теоретическая температура горения, °С	1903	2030	2069

Таблица 4.35 – Показатели качества шихтовых материалов доменной печи № 4 в периоды I-III

Наименование показателей	Содержание некондиционного агломерата в массе железорудной части шихты, %		
	6,5	7,8	7,3
Номер периода	I	II	III
Содержание фракции 0-5 мм в агломерате	8,5	10,0	9,2
Содержание золы в коксе	12,00	11,94	11,94
Холодная прочность кокса по показателям, %: M10	7,38	7,17	7,84
M25	87,63	87,48	86,52
Горячая прочность кокса по CSR, %	34,70	29,60	34,70
Реакционная способность кокса (CRI), %	40,90	44,45	39,65

Уменьшение газопроницаемости на периферии в периоде II по сравнению с периодом I увеличивало коэффициент сопротивления шихты движению газового потока в верхней части печи на 14,8 % (табл. 4.33) при снижении расхода дутья на 15 м³/мин (табл. 4.34) и уменьшении степени открытия малого снорта от 34 до 25 %. В направлении увеличения взаимного сопротивления потоков шихты и газа в верхней части печи действовало увеличение содержания фракции 0-5 мм в кондиционном агломерате от 8,5 до 10,0 % (табл. 4.25) в условиях увеличения его доли в шихте от 65,1 до 68,8 %.

В результате, в периоде II по сравнению с периодом I уменьшилась производительность, приведенная к условиям периода I от 3462 до 3449 т/сут при уменьшении удельного расхода кокса от 426,2 до 423,4 кг/т чугуна.

Таблица 4.36 – Результаты химического анализа продуктов плавки доменной печи № 4

Наименование показателей	Содержание некондиционного агломерата в массе железорудной части шихты, %		
	6,5	7,8	7,3
Номер периода	I	II	III
Содержание в чугуне, %: Si	0,74	0,72	0,65
Mn	0,17	0,19	0,19
S	0,024	0,019	0,022
Ti	0,046	0,052	0,060
P	0,051	0,048	0,054
Cr	0,018	0,020	0,025
C	4,695	4,833	4,670
V	0,069	0,084	0,082
Содержание в шлаке, %: SiO ₂	38,85	39,18	38,56
Al ₂ O ₃	10,72	10,55	11,46
TiO ₂	0,62	0,63	0,93
CaO	38,94	39,71	38,01
MgO	7,45	7,33	7,81
S	0,70	0,71	0,68
FeO	0,23	0,24	0,27
MnO	0,18	0,19	0,26
CaO/SiO ₂	1,00	1,01	0,99

Таблица 4.37 – Показатели дренажной способности коксовой насадки в горне доменной печи № 4 в периоды I-III

Наименование показателей	Содержание некондиционного агломерата в массе железорудной части шихты, %		
	6,5	7,8	7,3
Номер периода	I	II	III
Количество шлака, остающегося в горне, тонны	16,60	16,68	19,49
Подвижность шлака, Па·с	0,76	0,61	0,66
Показатель DMI	149	111	178
Показатель растворимости углерода в чугуне	96,84	99,11	95,65

В периоде III по сравнению с периодом II увеличилось количество газов, проходящих через периферию, на что указывает рост градиента температур между периферийным и колошниковым газом от 222 до 240 °С. На это повлияло уменьшение поступления некондиционного агломерата в пристеночную зону печи. Согласно табл. 4.27 доля некондиционного агломерата, поступающего со станций углового положения лотка № 10-11 уменьшилась от 27 до 8 % от его расхода. Кроме того, увеличилась доля окатышей в периоде III по сравнению с периодом II от 31,20 до 37,0 %. Однако, температура холодильников шахты не увеличивалась, а наоборот, по инерции уменьшалась от 51,6 до 49,6 °С. Что указывает на то, что использование некондиционного агломерата компенсировало отрицательное влияние повышения доли окатышей на преждевременное истирание футеровки шахты.

В периоде III по сравнению с периодами II и I увеличилась равномерность соотношения долей коксовой фракции и некондиционного агломерата по трем кольцевым зонам колошника – периферия (соответствует угловому положению лотка №№ 10-11), рудный гребень (№№ 5-7) и промежуточная между периферией и рудным гребнем (№№ 8-9). Для трех кольцевых зон стандартное отклонение соотношения долей фракции и некондиционного агломерата составило 0,40 в периоде I, 0,56 в периоде II и 0,36 в периоде III.

В периоде III уменьшился коэффициент сопротивления шихты движению газового потока по сравнению с периодом II на 3,9 % в условиях уменьшения интенсивности по дутью на 2,4 % при увеличении расхода природного газа на 12,5 % и уменьшения степени открытия малого снорта от 25 до 13 %.

Увеличение расхода природного газа в периоде III по сравнению с периодом II на 2,2 тыс. м³/час сопровождалось повышением степени использования водорода от 45,3 до 46,1 % при уменьшении степени использования СО от 42,2 до 40,9 %. Смещение процессов восстановления в область умеренных температур обеспечило снижение удельного расхода кокса от 423,4 до 422,6 кг/т чугуна. Производительность печи увеличилась от 3449 до 3509 т/сут.

Таким образом, увеличение доли некондиционного агломерата, поступающего в зону рудного гребня от 41 до 50 % от его расхода, в промежуточную зону между рудным гребнем и периферией от 34 до 42 % при уменьшении его содержания на периферии от 25 до 8 % от его расхода увеличивало производительность печи на 53,5 т/сут при уменьшении удельного расхода кокса на 3,3 кг/т чугуна.

Выводы по главе 4

1. Разработаны и обоснованы рациональные режимы загрузки некондиционного агломерата, по результатам исследований на доменных печах №№ 4, 6, 9 и 10 ПАО «ММК».

2. Увеличение расхода некондиционного агломерата на каждый процент в интервале 1-20 % целесообразно сопровождать одним из следующих мероприятий для предотвращения сдерживания процессов производства чугуна по интенсивности газового потока вверху печи:

- повышение доли окатышей на 0,5-1 % от расхода железорудного сырья;
- повышение доли агломерата повышенного качества фабрики № 5 на 1 % от расхода железорудного сырья;

- применение коксовой фракции в количестве 2,5 кг/т чугуна.

3. Загружать некондиционный агломерат преимущественно в зону рудного гребня и промежуточную зону между периферией и рудным гребнем в смеси с коксовой фракцией или агломератом фабрики № 5. Для этого некондиционный агломерат целесообразно размещать во втором рудном скипе с выгрузкой в колошниковое пространство печи с позиций углового положения лотка №№ 5-9. Промышленными исследованиями установлено, что 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.

4. В условиях работы печи с разгаром футеровки целесообразно некондиционный агломерат загружать в пристеночную зону печи. Для этого некондиционный агломерат размещать в нижней части бункера бесконусного загрузочного устройства с выгрузкой в колошниковое пространство печи с позиций углового положения лотка №№ 10-11. Промышленными исследованиями установлено, что 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 %.

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 вверху 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.

Список используемой литературы

1. Еланский, Д.Г. Безуглеродная чёрная металлургия – пути и их стоимость / Д.Г. Еланский // XVI Международный конгресс сталеплавильщиков и производителей металлов. – Екатеринбург. – 2021. – С. 51-57.
2. Неделин, С.В. Перспективы развития чёрной металлургии с учётом экологических ограничений / С.В. Неделин // XVI Международный конгресс сталеплавильщиков и производителей металлов. – Екатеринбург. – 2021. – С. 38-44.
3. Григорович, К.В. XIV Международный конгресс сталеплавильщиков и производителей металла «Сталь в ногу со временем» / К.В. Григорович, А.Е. Сёмин // Тяжелое машиностроение. – 2017. – № 1-2. – С. 2-5.
4. Леонтьев, Л.И. О проблемах импортозамещения в горно-металлургическом комплексе / Л.И. Леонтьев // Труды научно-практической конференции с международным участием и элементами школ молодых ученых «Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР». – 2015. – С. 16-25.
5. Банных, О.А. О роли стали в 21-м веке / О.А. Банных // Электрометаллургия. – 2005. – № 5. – С. 6-13.
6. Подгородецкий, Г.С. Современные направления развития и повышения энергоэкологической эффективности черной металлургии / Г.С. Подгородецкий, Л.А. Шульц // Экология и промышленность России. – 2016. – Т. 20. – № 4. – С. 46-52.
7. Торохов, Г.В. Современное состояние и перспективы металлургии железа / Г.В. Торохов, А.Я. Травянов, О.В. Голубев, П.И. Черноусов // XVI Международный конгресс сталеплавильщиков и производителей металлов. – Екатеринбург. – 2021. – С. 357-363.
8. Третьяк, А.А. Доменное производство России в 2011-2016 годы / А.А. Третьяк // Металлургия чугуна – вызовы XXI века. Труды VIII Международного конгресса доменщиков. М.: Издательский дом «Кодекс», 2017. – С. 21-34.

9. Курунов, И.Ф. Состояние и тенденции развития металлургии железа в свете вызовов XXI века / И.Ф. Курунов // Металлургия чугуна – вызовы XXI века. Труды VIII Международного конгресса доменщиков М.: Издательский дом «Кодекс», 2017. – С. 10-20.
10. Никифоров, Г.В. Энергосбережение и управление энергосбережением в металлургическом производстве / Г.В. Никифоров, В.К. Олейников, Б.И. Заславец. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 480 с.
11. Роцин, В.Е. Физика пирометаллургических процессов / В.Е. Роцин, А.В. Роцин. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2021 г. – 304 с.
12. Смирнов, Л.А. Уральскому институту металлов – 85 лет / Л.А. Смирнов, А.Ю. Ерцев // Сталь. – 2015. – № 11. – С. 2-5.
13. Леонтьев, Л.И. Состояние и перспективы производства ферросплавов в РФ / Л.И. Леонтьев, Л.А. Смирнов, В.И. Жучков, А.В. Жданов, В.Я. Дашевский, С.А. Гурова // Металлург. – 2015. – № 11. – С. 11-15.
14. Юсфин, Ю.С. Металлургия железа / Ю.С. Юсфин, Н.Ф. Пашков. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. – 464 с.
15. Жеребин, Б.Н. Металлургия чугуна / Б.Н. Жеребин, А.Н. Похвиснев, Ю.С. Юсфин и др. – М.: Академия, 2004. – 774 с.
16. Роменец, В.А. Инновационное решение проблем утилизации железосодержащих отходов металлургического производства / В.А. Роменец, С.А. Макеев, Ю.В. Похвиснев, В.С. Валавин, А.А. Федорова, А.И. Гиммельфарб, М.Я. Левин, В.И. Галкин // Экономика в промышленности. – 2011. – № 3. – С. 32-38.
17. Смирнов, Л.А. Некоторые теоретические аспекты технологии совместного вдувания природного газа и пылеугольного топлива / Л.А. Смирнов, Б.С. Тлеугабулов, С.А. Загайнов, К.Б. Пыхтеева, В.В. Филиппов, В.А. Михалев, К.В. Миронов // Черная металлургия. – 2016. – № 5 (1397). – С. 19-23.
18. Роцин, В.Е. Физика процессов окисления и восстановления металлов в твердой фазе / В.Е. Роцин, А.В. Роцин // Металлы. – 2015. – № 3. – С. 19-25.
19. Андронов, В.Н. Современная доменная плавка / В.Н. Андронов – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. – 100 с.

20. Дмитриев, А.Н. Математическое моделирование доменного процесса / А.Н. Дмитриев. – Екатеринбург: УРО РАН, 2011. – 162 с.
21. Тарасов, В.П. Теория и технология доменной плавки / В.П. Тарасов, П.В. Тарасов. – М.: Интермет Инжиниринг, 2007. – 384 с.
22. Бардин, И.П. Доменное производство: справочник. Том 2 / И.П. Бардин. – М.: Metallurgizdat, 1963. – 650 с.
23. Павлов, М.А. Metallургия чугуна. Часть II. / М.А. Павлов. – М.: ГНТИ лит. по чер. и цветн. metallургии, 1945. – 492 с.
24. Готлиб, А.Д. Доменный процесс / А.Д. Готлиб. – М.: Metallургия, 1966. – 504 с.
25. Рамм, А.Н. Современный доменный процесс / А.Н. Рамм. – М.: Metallургия, 1980. – 303 с.
26. Жеребин, Б.Н. Практика ведения доменной печи / Б.Н. Жеребин. – М.: Metallургия, 1980. – 248 с.
27. Тарасов, П.В. Распределение материалов и газов по окружности доменной печи / П.В. Тарасов // Черная metallургия. – 2007. – №5. – С. 17-22. – 1979. – №22. – С. 7-13.
28. Рощин, В.Е. Физическая интерпретация теории восстановления окисления металлов / В.Е. Рощин, А.В. Рощин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallургия. – 2016. – Т. 16. № 4. – С. 29-39.
29. Дудоров, М.В. Термодинамика роста металлической фазы при твердофазном восстановлении металлов в комплексных оксидах / Дудоров М.В., Дрозин А.Д., Рощин В.Е. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Химия. – 2021. – Т. 13. № 3. – С. 49-59.
30. Большаков, В.И. Об оценке распределителей шихты доменной печи / В.И. Большаков, С.Т. Плискановский // Metallургическая и горнорудная промышленность. – 2007. – № 3. – С. 12-14.
31. Юшина, Т.И. Перспектива использования природного и техногенного железорудного сырья в Российской Федерации / Т.И. Юшина, И.М. Петров,

Г.И. Авдеев, И.О. Крылов, В.С. Валавин, С.Г. Пак, В.Н. Дунаева // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 2. – С. 416.

32. Овчинников, Ю.Н. Автоматическая коррекция параметров комбинированного дутья / Ю.Н. Овчинников, Н.А. Спирин, В.В. Мадисон и др. // Metallurg. – 1981. – № 6. – С. 15-16.

33. Дмитриев, А.Н. Двумерная математическая модель доменного процесса / А.Н. Дмитриев, С.В. Шаврин // Сталь. – 1996. – №12. – С. 7-13.

34. Андронов, В.Н. Минимально возможный расход кокса и влияние на него различных факторов доменной плавки / В.Н. Андронов – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. – 142 с.

35. Юсфин, Ю.С. Определение минимально возможного расхода кокса на доменную плавку / Ю.С. Юсфин, П.И. Черноусов, А.Я. Травянов // Metallurg. – 1998. – №4. – С. 22-25.

36. Дмитриев, А.Н. Формирование качества кокса за счет изменения состава угольной шихты для коксования, влияние качества кокса на его расход в доменной плавке и производительность / А.Н. Дмитриев // Черная металлургия. – 2018. – № 4 (1420). – С. 40-45.

37. Аржадеева, Г.Ю. Влияние реакционной способности кокса на технико-экономические показатели доменного процесса / Г.Ю. Аржадеева, А.Н. Дмитриев, Ю.А. Чесноков // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2011. – Т. 1. – № 69. – С. 100-103.

38. Дмитриев, А.Н. Совершенствование аглококсодоменного производства с использованием цифровых технологий в рамках “ИНДУСТРИИ 4.0” / А.Н. Дмитриев, М.О. Золотых, Г.Ю. Витькина // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2020. – Т. 76. – № 4. – С. 339-345.

39. Дрожилов, Л.А. Требования к качеству железорудных окатышей для доменного производства / Л.А. Дрожилов, Н.А. Гладков, О.М. Журавлев и др. // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 1977. – № 23. – С. 41-48.

40. Дворниченко, И.Ф. Сравнительная характеристика металлургических свойств агломерата и окатышей разных предприятий / И.Ф. Дворниченко, Ф.М. Журавлев, В.Д. Астафьев // *Сталь*. – 1986. – № 10. – С.21-23.
41. Губин, Г.В. О некоторых металлургических характеристиках отечественных и североамериканских окатышей / Г.В. Губин, Ф.М. Журавлев // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 1975. – № 4. – С.5-10.
42. Котов, А.П. Сравнительная оценка основных металлургических свойств агломерата и окатышей / А.П. Котов, В.А. Улахович, В.И. Солодков и др. // *Металлург*. – 1979. – № 2. – С.8-11.
43. Прокофьев, И.А. Работа доменной печи с использованием освобожденного от мелочи высокоосновного агломерата / И.А. Прокофьев, И.Г. Товаровский, В.И. Бондаренко и др. // *Сталь*. – 1979. – № 5. – С. – 332 - 333.
44. Плевако, В.С. Качество сырья и эффективность доменного производства / В.С. Плевако, А.В. Емельянов, А.А. Гринвальд. – Днепропетровск: Промшь, 1971. – С. 8.
45. Витькина, Г.Ю. Исследование основных металлургических характеристик железорудных материалов (агломерат и окатыши) / Г.Ю. Витькина, А.Н. Дмитриев, Р.В. Алекторов // В сборнике: *Промышленное производство и металлургия. Материалы международной научно-технической конференции. Министерство науки и высшего образования РФ, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Нижнетагильский технологический институт (филиал) УрФУ*. – 2020. – С. 132-137.
46. Минаков, Н.С. Об оценке механической прочности агломерата / Н.С. Минаков, Б.М. Борнабаев, Г.А. Арыков и др. // *Сталь*. – № 11. – С. 7-9.
47. Семакова, В.Б. Возможности совершенствования оценки прочностных характеристик агломерата / В.Б. Семакова, В.П. Русских, Е.И. Пилюгин // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2010. – № 6. – С. 12-15.
48. Вязникова, Е.А. Некоторые особенности минералогического состава железорудных агломератов / Е.А. Вязникова, А.Н. Дмитриев, Г.Ю. Витькина, Р.В. Алекторов, Л.А. Овчинникова // В сборнике: *перспективы развития металлургии и*

машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР. Труды научно-практической конференции с международным участием и элементами школы молодых ученых: 65-летию ИМЕТ УрО РАН. – 2020. – С. 195-198.

49. Берсенев, И.С. Методика оценки качества железорудного агломерата по его химическому составу / И.С. Берсенев, В.И. Клейн, В.И. Матюхин, Ю.Г. Ярошенко // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2009. – № 10 – С. 3-6.

50. Можаренко, Н.М. К вопросу о качестве железорудных материалов / Н.М. Можаренко, Н.А. Гладков, А.С. Нестеров и др. // Сталь. – 1997. – № 8. – С. 3-5.

51. Массовое использование в доменных печах мелкого агломерата. // Новости черной металлургии за рубежом. – 1996. – № 3. – С.41-42.

52. Титов, В.Н. Использование мелких фракций агломерата и кокса в условиях интенсивной работы доменных печей / В.Н. Титов, Л.С. Ивлева, А.А. Пишикин // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – № 5. – 2017. – С. 28-33.

53. Пат. 2095420 РФ, кл. С21В 5/00. Способ загрузки доменной печи / Э.А. Шепетовский, И.С. Яриков, Н.Г. Иванча др., опубл. 10.11.1997.

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

55. Пат. 2518880 РФ, кл. С21В 7/00. Способ загрузки доменной печи / М.Ю. Суханов, М.А. Гуркин, М.М. Каримов и др., опубл. 10.06.2014.

56. Опыт исследования системы загрузки современной доменной печи / В.И. Большаков, Н.Г. Иванча, В.Н. Логинов и др. // Сталь. – 1996. – № 10. – С. 2-5.

57. Никитин, Л.Д. Формирование рациональной структуры столба шихтовых материалов в доменной печи / Л.Д. Никитин, В.А. Долинский, С.Ф. Бугаев и др. // Металлург. – 2004. – № 2. – С. 26-28.

58. Логинов, В.И. Влияние смешивания рудного сырья с коксом на газодинамические условия и технико-экономические показатели доменной плавки / В.И. Логинов, А.Л. Берин, С.М. Соломатин и др. // Сталь. – 1977. – № 5. – С. 391-394.

59. Логинов, В.И. Опытные плавки при загрузке доменных печей смесью кокса и агломерата / В.И. Логинов, С.М. Соломатин, А.Т. Корж // Metallurg. – 1976. – №4. – С. 14-18.

60. Логинов, В.И. Загрузка доменной печи смесью агломерата и кокса / В.И. Логинов, С.М. Соломатин, А.Т. Корж и др. // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 1974. – №17 (733). – С. 33-35.

61. Логинов, В.И. Загрузка железорудных материалов в смеси с коксом / В.И. Логинов, К.А. Мусиенко, А.Л. Берин и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1984. – №3. – С. 10-12.

62. Логинов, В.И. Работа доменной печи при совместной загрузке железорудных материалов и кокса в скип / В.И. Логинов, К.А. Мусиенко, Д.В. Воронков и др. // Сталь. - 1987. - №12. – С. 7-12.

63. Берин, А.Л. Влияние смешивания шихты на газодинамические условия доменной плавки / А.Л. Берин, А.И. Васюченко, И.И. Дышлевич и др. // Сталь. – 1994. – № 3. – С. 16-20.

64. Доброскок, В.А. Разработка режима загрузки и опыт применения мелкофракционного кокса в мощной доменной печи / В.А. Доброскок, Ю.В. Липухин, И.Ф. Курунов, В.Н. Логинов // Сталь. – 1998. – № 8. – С. 7-13.

65. Никитин, Л.Д. Работа доменных печей с использованием кокса мелких фракций / Л.Д. Никитин, М.Ф. Марьясов, В.П. Горбачев, С.Ф. Бугаев, Ю.М. Денисов // Metallurg. – 1999. – № 1. – С. 38–39.

66. Пишнограев, С.Н. Использование коксовой мелочи в доменных печах ОАО «ММК» / С.Н. Пишнограев, А.В. Чевычелов, В.А. Гостенин, Н.С. Штафиенко, В.П. Гридасов // Сталь. – 2009. – №10. – С.6-9.

67. Ярошевский, С.Л. Эффективность использования кокса фракции менее 40 мм в доменной плавке / С.Л. Ярошевский, В.А. Ноздрачев, А.П. Чеботарев и др. // *Металлург.* – 2000. – № 12. – С. 32-35.

68. 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.

69. Пат. 2673898 РФ кл. C21B 5/00. Способ загрузки доменной печи / Е.Н. Виноградов, А.А. Калько, М.М. Каримов и др. опубл. 03.18.2018.

70. Крячко, Г.Ю. К вопросу об оценке работы распределителей шихты для доменной печи / Г.Ю. Крячко, С.Ю. Андриенко // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 2007. – № 1. – С.8-11.

71. Большаков, В.И. Исследование особенностей распределения шихтовых материалов в доменной печи / В.И. Большаков, Н.А. Гладков, Ф.М. Шутылев, Т.П. Порубова // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 2006. – № 6. – С. 7-10.

72. Тахаутдинов, Р.С. Технологические аспекты работы доменных печей с БЗУ «PAUL WURTH» / Р.С. Тахаутдинов, С.Н. Ушаков, В.И. Сединкин, А.Л. Мавров, А.В. Чевычелов, А.В. Павлов // *Сталь.* – 2008. – № 11. – С. 15-17.

73. Козин, Ю.А. О технологических резервах бесконусных загрузочных устройств доменных печей / Ю.А. Козин, Лазуткин С.Е. // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия.* – 1994. – № 9. – С. 6-9.

74. Рыбцов, А.В. Промышленная эксплуатация лоткового загрузочного устройства доменной печи / А.В. Рыбцов, В.П. Лозовой, С.В. Поляничко, Е.И. Четыркин // *Сталь.* – 1992. – № 5. – С. 13-18.

75. Большаков, В.И. Об оценке эффективности применения бесконусных загрузочных устройств доменных печей / В.И. Большаков // *Металлург.* – 2010. – № 3. – С. 42-45.

76. Большаков, В.И. Теория и практика загрузки доменных печей / В.И. Большаков. – М.: Металлургия, 1990. – 256 с.

77. Большаков, В.И. Совершенствование способов загрузки доменных печей в СССР и за рубежом / В.И. Большаков, В.Л. Покрышкин, Ф.М. Шутылев // Черная металлургия. Сер. «Подготовка сырьевых материалов к металлургическому переделу и производство чугуна»: Обзорная информация. Ин-т Черметинформация. – Вып. 2. – М., 1983. – 32 с.

78. Большаков, В.И. Доменное производство «Криворожстали» / В.И. Большаков. – Днепропетровск: ИЧМ «Криворожсталь», 2004. – 376 с.

79. Большаков, В.И. Обеспечение эффективной работы доменных печей, оснащенных бесконусными загрузочными устройствами / В.И. Большаков // Доменное производство. Труды международного конгресса доменщиков. – 2010. – С. 148-153.

80. Друкентанер, Г. Система оптимизации работы доменной печи «VAIRON» – экспертная система / Г. Друкентанер, Б. Шюрц, М. Шалер // Черные металлы. – 2000. – №6. – С. 64-72.

81. Большаков, В.И. Направления исследований и научных разработок института черной металлургии НАН Украины / В.И. Большаков // Металлург. – 2011. – № 1. – С. 11-13.

82. Вайсберг, Л.А. Совершенствование систем шихтоподготовки в доменном производстве / Л.А. Вайсберг, А.Н. Коровников, Г.С. Подгородецкий // Черные металлы. – 2017. – № 8. – С. 24-27.

83. Бачинин, А.А. Освоение технологии доменной плавки на печи, оборудованной бесконусным загрузочным устройством с лотковым распределителем шихты / А.А. Бачинин, А.Г. Попов, В.С. Поляничко, В.П. Лозовой, Е.И. Четыркин // Сталь. – 1993. – № 3. – С. 14-21.

84. Покрышкин, В.Л. Эффективность работы доменных печей различного полезного объема, оснащенных бесконусным загрузочным устройством / В.Л. Покрышкин, Ю.В. Рак // Сталь. – 1992. – № 7. – С. 8-15.

85. Покрышкин, В.Л. Оценка эффективности использования технологических возможностей БЗУ по данным тепловых и материальных балансов

/ В.Л. Покрышкин, Ю.В. Рак, Н.Е. Ходотова // Сталь. – 1989. – № 4. – С. 10-14.

86. Курунов, И.Ф. К вопросу об эффективности применения на доменных печах различных загрузочных устройств / И.Ф. Курунов // Metallurg. – 2009. – № 11. – С. 34-41.

87. Большаков, В.И. Управление распределением гранулометрического состава порций шихты на доменном конвейере / В.И. Большаков, Н.Г. Иванча, В.А. Улахович и др. // Сталь. – 1989. – № 5. – С. 13-16.

88. Клоцман, Е.Я. Исследование связи процессов истечения шихтовых материалов из весовых бункеров шихтоподачи и бункеров бесконусного загрузочного устройства / Е.Я. Клоцман, В.Ф. Солодко, Г.С. Зозуля // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 1989. – № 1. – С. 52-53.

89. Кадзивора И. Разработка модели распределения шихты при бесконусной загрузке на основе экспериментов на полномасштабной модели / И. Кадзивора, И. Дзимбо, Т. Дзекко и др. // Тэцу то хаганэ. – 1985. – Т. 17. – № 2. – С. 29-36.

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

91. Харченко, А.С. Интерактивная система энергоресурсосбережения при выплавке чугуна в доменных печах, оснащенных лотковым загрузочным устройством: научно обоснованные технологические решения: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.16.02 / А.С. Харченко. - Магнитогорск, 2019. – 434 с.

92. 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. Сибегатуллин, Н.П. Сысоев // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2011. – № 8. – С. 18-19.

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

94. Большаков, В.И. Траектории движения шихты в колошниковом пространстве современной доменной печи / В.И. Большаков, А.Ю. Зарембо // Черная металлургия. – 1985. – Вып. 20 (1000). – С. 35-37.

95. Тарасов, В.П. Поле скоростей в слое шихты на колошнике при загрузке доменной печи / В.П. Тарасов, В.П. Грызун // Сталь. – 1996. – №5. – С. 3-5.

96. Большаков, В.И. Определение рациональной длины распределительного лотка загрузочного устройства доменной печи объемом 5500 м³ / В.И. Большаков, А.К. Икконен, В.И. Нетронин, А.Ю. Зарембо // Сталь. – 1995. – №5. – С. 25-28.

97. Большаков, В.И. Исследование распределения шихты и газового потока доменной печи большого объема при использовании БЗУ / В.И. Большаков, С.Т. Шулико, В.В. Канаев, Ф.М. Шутылев, В.В. Логинов // Металлург. – 1997. -№12. – С. 16-17.

98. Большаков, В.И. Освоение оборудования систем загрузки доменных печей с бесконусным загрузочным устройством / В.И. Большаков, А.Ю. Зарембо, Н.Г. Иванча, Ф.М. Шутылев // Сталь. – 1997. – № 1. – С. 4-9.

99. Фоменко, А.П. Исследование работы доменной печи с усовершенствованной винтовой загрузкой шихтовых материалов / А.П. Фоменко, Н.В. Крутас, А.В. Казьмин и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2011. – № 1. – С. 10-12.

100. Покрышкин, В.Л. Особенности распределения материалов в доменной печи объемом 5000 м³ с бесконусным загрузочным устройством / В.Л. Покрышкин, В.И. Большаков, И.Т. Хомич и др. // Сталь. – 1982. – №11. – С. 13-16.

101. Танчик, Е.М. Сегрегация частиц шихты в колошниковом пространстве доменной печи, оборудованной бесконусным загрузочным устройством / Е.М. Танчик, З.А. Родионенко, М.Н. Горбачев, Г.И. Семенова // Черная

металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 1990. – № 8. – С. 52-53.

102. Тарасов, В.П. Сегрегация материалов по радиусу колошника доменной печи / В.П. Тарасов, В.П. Грызун // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1990. – № 5. – С. 20-22.

103. Доброскок, В.А. Исследование кластерной структуры шихтовых материалов доменной плавки на основе измерения их электрического сопротивления / В.А. Доброскок, Д.С. Кокорин, Р.А. Михин, Ю.С. Юсфин // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2010. – № 3. – С. 3-5.

104. Тарасов, В.П. К вопросу радиального распределения материалов и газов в доменной печи / В.П. Тарасов // Сталь. – 2003. – № 6. – С. 31-35.

105. Тарасов, В.П. Газодинамические параметры и показатели работы доменных печей при загрузке шихты типовым конусным и бесконусным загрузочным устройством / В.П. Тарасов, П.В. Тарасов, Л.В. Быков // Сталь. – 2005. – № 1. – С. 6-10.

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

107. Сибгатуллин, С.К. Действие расхода природного газа на коэффициент сопротивления шихты в зависимости от условий хода доменной плавки / С.К. Сибгатуллин, А.С. Харченко, Е.О. Харченко Е.О. и др. //Литейные процессы. –2016. – № 15. – С. 36-42.

108. Стефанович, М.А. Анализ хода доменного процесса / М.А. Стефанович. – Свердловск: Metallurgizdat, 1960. – 284 с.

109. Стефанович, М.А. Закономерности движения шихты и газа в доменной печи / М.А. Стефанович, С.К. Сибгатуллин, Д.Н. Гушин. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2011. – 161 с.

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

111. 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. Сибгатуллин, Е.О. Харченко и др.

112. 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. Сибгатуллин, Е.О. Харченко.

113. 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. Сибгатуллин, Е.О. Харченко и др.

114. 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. Сибгатуллин, Е.О. Харченко и др.

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

116. 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. Сибгатуллин,

Е.О. Теплых (Е.О. Харченко) и др. // Теория и практика тепловых процессов в металлургии: сборник докладов Международной научно-практической конференции. - Екатеринбург: ГОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», 2012. - С. 150-154.

117. 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. Сибагатуллин, А.С. Харченко и др. // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве: сборник докладов 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.

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

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

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

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

122. 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.

123. Сибатуллин, С.К. 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.

124. Chevychelov, A.V. 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.

125. 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, А.В. Чевычелов, В.А. Бегинюк // Металлургические процессы и оборудование. - 2013. - № 4. - С. 55-61.

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

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

128. Пат. 2700977 РФ, кл. С21В5/00. Способ загрузки доменной печи / А.С. Харченко, С.К. Сибатуллин, Е.О. Харченко и др.; опубл. 24.09.2019.

129. Пат. 2722846 РФ, кл. С21В5/00. Способ загрузки доменной печи / А.С. Харченко, С.К. Сибатуллин, Е.О. Харченко и др; опубл. 06.04.2020.

130. 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. Сибагатуллин, Е.О. Теплых, А.С. Харченко // Черные металлы. - 2012. - № 5. - С. 43-45.

131. Сибагатуллин, С.К. Рациональное размещение материалов в шихтовом бункере компактного бесконусного загрузочного устройства / С.К. Сибагатуллин, А.С. Харченко, Е.О. Теплых, В.А. Бегинюк, М.А. Семенюк, Д.Н. Гуцин // Metallurgical processes and equipment. - 2014. - № 1. - С. 27-32.

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

133. Сибагатуллин, С.К. Влияние режимов загрузки компактным БЗУ лоткового типа на тепловые нагрузки системы охлаждения доменных печей / С.К. Сибагатуллин, А.С. Харченко, Е.О. Харченко и др. // Metallurgy: technologies, innovations, quality: collection of papers of the 19th International scientific-practical conference. Novokuznetsk. SIBGIU, 2015. - С. 27-31.

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

Приложение А

УТВЕРЖДАЮ
 Главный специалист группы
 по развитию ИТЦ ПАО «ММК»
 С.В. Денисов
 «16» 04 2020 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов работ по договору № 239895 от 06.08.2019 с ФГБОУ ВО «МГУ им. Г.И. Носова» по теме: «Разработка ресурсосберегающей технологии выплавки чугуна на доменных печах ПАО «ММК» рациональным использованием некондиционного агломерата».

Данная работа проводится в соответствии с главой IV «Рациональное природопользование», пунктом 1 «Технологии мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды, предотвращения и ликвидации ее загрязнений» статьей 20 «Разработка технологий по повышению степени использования сырьевого потенциала техногенных образований и отходов» «Перечня научных исследований и опытно-конструкторских разработок, расходы налогоплательщика на которые в соответствии с п. 7 ст. 262 части второй НК РФ включаются в состав прочих расходов в размере фактических затрат с коэффициентом 1,5», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.12.2008 №988 (в ред. Постановлений Правительства РФ от 13.10.2011 №836, от 06.02.2012 №96).

Краткое описание выполненной работы

Разработаны и внедрены рациональные режимы загрузки некондиционного агломерата для различных газодинамических условий и технического состояния доменных печей ПАО «ММК» на основании проведенных исследований на доменных печах с применением физического и математического моделирования. В исследованиях и тестовых испытаниях, проведенных на доменных печах, оснащенных бесконусным загрузочным устройством, уменьшение удельного расхода кокса и повышение производительности соответствовали техническому заданию.

Выявлен допустимый расход некондиционного агломерата – до 5 % от массы железорудного сырья при условии выполнения следующих компенсирующих мероприятий:

1. Режим загрузки некондиционного агломерата с одновременным повышением расхода окатышей в шихте; рост доли окатышей на 0,5 % позволяет увеличить потребление некондиционного агломерата на 1 %.

2. Режим совместной загрузки коксовой фракции и некондиционного агломерата: 2,5 кг/т чугуна фракции на каждый 1 % агломерата.

3. Технологии осуществления:

- основная номинальная: реализуется размещением некондиционного агломерата преимущественно в зоне рудного гребня и промежуточной зоне между периферией и рудным гребнем в смеси с коксовой фракцией.

- специальная: реализуется на печи с разгаром футеровки путём загрузки некондиционного агломерата в пристеночную зону.

Полученный результат

Применительно к доменным печам №№ 2, 4, 6, 9 и 10 ПАО «ММК» внедрена ресурсосберегающая технология, обеспечивающая уменьшение удельного расхода кокса и повышение производительности в соответствии с техническим заданием – повышение производительности на 10 т/сутки и снижение удельного расхода кокса на 0,1 кг/т чугуна.

Подготовлен проект дополнения в технологическую инструкцию ТИ 101-Д-22-2019.

Выявление по результатам НИОКР источника, который может причинить вред здоровью или травмы – не выявлено.

Способность к правовой охране полученного результата: не выявлена.

Дата фактического внедрения « 1 » 04 2020 г.

Срок полезного использования: 2 года.

Приложение Б



ПРОЕКТ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ИНСТРУКЦИИ ТИ 101-Д-22-2019

по результатам выполнения договора НИРиТР № 239895 от 06.08.2019 г.

Тема: «Разработка ресурсосберегающей технологии выплавки чугуна на доменных печах ЦАО «ММК» рациональным использованием некондиционного агломерата».

Ввести дополнение в пункт 5.2.5:

Для стабильной работы печи в условиях использования некондиционного агломерата целесообразно расходовать его не более 5 % от массы железорудного сырья с одновременным повышением расхода окатышей в шихте. Рост доли окатышей на 0,5 % позволяет увеличить потребление некондиционного агломерата на 1 %.

Загружать некондиционный агломерат следует преимущественно в зону рудного гребня и промежуточную зону между периферией и рудным гребнем.

В результате, изложить пункт 5.2.5 в следующей редакции:

Случаи, вызывающие необходимость изменения массы подачи, уровня засыпи, систем загрузки режима работы вращающегося распределителя и матрицы загрузки на печах с БЗУ могут иметь место:

- при существенных изменениях шихтовых условий, в первую очередь гранулометрического состава и прочностных характеристик железорудных материалов и кокса. Для стабильной работы печи в условиях использования некондиционного агломерата целесообразно расходовать его не более 5 % от массы железорудного сырья с одновременным повышением расхода окатышей в шихте. Рост доли окатышей на 0,5 % позволяет увеличить потребление некондиционного агломерата на 1 %. Загружать некондиционный агломерат следует преимущественно в зону рудного гребня и промежуточную зону между периферией и рудным гребнем;

- при обнаружении признаков отклонения от нормального хода печи и недостаточного, по этой причине, использования химической и тепловой энергии газов (например, усиление периферийного или центрального хода печи);

- при перекосах уровня засыпи материалов в печи;

- при развитии потока газов каналами;

- при загрузке кокса одной стороной и по другим возможным причинам.