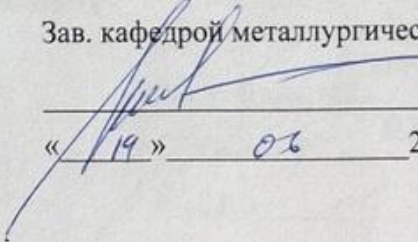


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»

Нижнетагильский технологический институт  
Кафедра металлургических технологий

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ ПЕРЕД ГЭК

Зав. кафедрой металлургических технологий

  
О.И. Шевченко

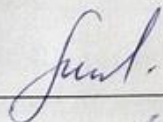
« 19 » 06 2024 г.

### ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА НА ГОРЯЧУЮ ПРОЧНОСТЬ И  
ВОССТАНОВИМОСТЬ ЖЕЛЕЗОРУДНОГО СЫРЬЯ В ДОМЕННОЙ  
ПЛАВКЕ

Пояснительная записка  
22.04.02 000 000 301 ПЗ

Руководитель  
канд. техн. наук, доцент



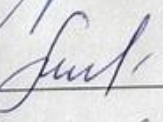
К.Б. Пыхтеева

Консультант  
д-р техн. наук, доцент



О.И. Шевченко

Консультант  
канд. техн. наук, доцент



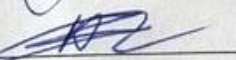
К.Б. Пыхтеева

Нормоконтролер



А.Ю. Лапина

Студент группы  
ТМ-222204-НТ



Т.Д. Котюков

Нижний Тагил  
2024

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Институт Нижнетагильский технологический  
Кафедра металлургических технологий  
Направление 22.04.02 Metallургия  
Образовательная программа Metallургия

УТВЕРЖДАЮ  
Зав. кафедрой МТ О.И. Шевченко  
(подпись) (Ф.И.О.)  
« 27 » 01 2024 г.

**ЗАДАНИЕ**

на выполнение выпускной квалификационной работы

студента Котюкова Тимофея Дмитриевича группы ТМ-222204-НТ  
(фамилия, имя, отчество)

1 Тема ВКР Влияние химического состава на горячую прочность и восстанавливаемость железорудного сырья в доменной плавке

Утверждена приказом по институту от «21» ноября 2023 г. № 81/05(НТ)

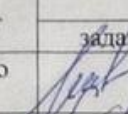

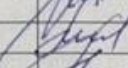
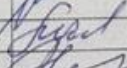
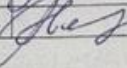
2 Руководитель Пыхтеева Ксения Борисовна, доцент, канд. техн. наук  
(Ф.И.О., должность, ученое звание, ученая степень)

3 Исходные данные к работе химический состав компонентов шихты, данные термических испытаний ХРС лабораторные металлургические испытания, стоимость компонентов шихты доменного производства.

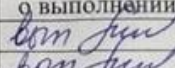
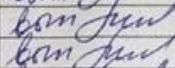
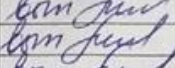
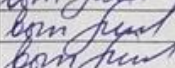
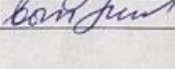
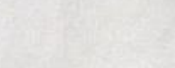
4 Содержание пояснительной записки (перечень подлежащих разработке вопросов)  
Вводные; оценка восстанавливаемости и горячей прочности железорудного сырья; восстанавливаемость железорудных окатышей; восстанавливаемость агломерата; оценка горячей прочности железорудного сырья в центре исследования сырья АО «ЕВРАЗ НТМК»; оценка показателей восстанавливаемости железорудного сырья в центре исследования сырья АО «ЕВРАЗ НТМК»; расчет оптимального химического состава железорудного сырья; расчет химического состава «шуга» и шлага; экологическая эффективность процесса; заключение; список использованных источников.

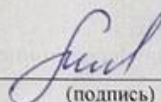
5 Перечень демонстрационных материалов корреляционный анализ; анализ горячей прочности ХРС; анализ восстанавливаемости ХРС; оптимальный химический состав; изменение показателей РТ65 и LTD-63; технико-экономические показатели.

6 Консультанты по проекту (работе) с указанием относящихся к ним разделов проекта

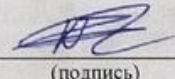
Раздел	Консультант	Подпись, дата	
		задание выдал	задание принял
Графическая часть (спецчасть)	О.И. Шевченко	 20.05.2024	 20.05.2024
Экономический	К.Б. Пыхтеева	 27.05.2024	 27.05.2024
Нормоконтроль	А.Ю. Лапина	 03.06.2024	 03.06.2024

7 Календарный план

Наименование этапов выполнения работы	Срок выполнения этапов работы	Отметка о выполнении
Технологическая часть	20.05.2024–22.05.2024	
Литературный обзор	23.05.2024–25.05.2024	
Разработка технологии	27.05.2024–31.05.2024	
Экономическая часть	03.06.2024–05.06.2024	
Графическая часть	05.06.2024–07.06.2024	
Нормоконтроль	10.06.2024–11.06.2024	

Руководитель  (подпись)

Пыхтеева К.Б.  
Ф.И.О.

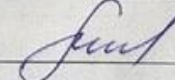
Задание принял к исполнению  (подпись)

Котюков Т.Д.  
Ф.И.О.


8 Выпускная квалификационная работа закончена «14» июня 2024 г.

Пояснительная записка и все материалы просмотрены  
Оценка консультантов: \* а) загчено б) загчено  
в) загчено г) загчено

Считаю возможным допустить Котюкова Т.Д.  
к защите его выпускной квалификационной работы в экзаменационной комиссии.

Руководитель 

9 Допустить Котюкова Т.Д. к защите выпускной квалификационной работы в экзаменационной комиссии (протокол заседания кафедры № 6 от « 14 » 06 2024 г.)

Зав. кафедрой  (подпись)

Шевченко О.И.  
Ф.И.О.

## РЕФЕРАТ

Отчет 86 с., 24 рис., 39 источ., 2 прил.

Ключевые слова: восстановимость, горячая прочность, железорудное сырье, восстановление, химический состав.

Объект ВКР – восстановимость и горячая прочность железорудного сырья.

Цель работы – оценить влияние химического состава железорудного сырья на его горячую прочность и восстановимость и определить оптимальный состав сырья, который не ухудшает качество выплавляемого чугуна и имеет повышенные металлургические свойства.

Методы и методология проведения работы – корреляционный и регрессионный анализ данных.

Результаты работы и их новизна – повышение восстановимости и горячей прочности железорудных материалов за счет изменения их химического состава.

Область применения полученных результатов – производство чугуна в доменном цехе АО «ЕВРАЗ НТМК».

Рекомендации по внедрению – предложить фабрикам окускования производить железорудное сырье с оптимальным химическим составом.

Значимость работы – снижении себестоимости чугуна за счет уменьшения удельного расхода кокса.

**ПЕРЕЧЕНЬ ЛИСТОВ ГРАФИЧЕСКИХ  
(ДЕМОНСТРАЦИОННЫХ) МАТЕРИАЛОВ**

№ п/п	Наименование	Обозначение	Формат
1	Корреляционный анализ	22.04.02 000 001 301	A1
2	Анализ горячей прочности ЖРС	22.04.02 000 002 301	A1
3	Анализ восстановимости ЖРС	22.04.02 000 003 301	A1
4	Оптимальный химический состав	22.04.02 000 004 301	A1
5	Изменение показателей $R_{t65}$ и $LTD_{+6,3}$	22.04.02 000 005 301	A1
6	Технико-экономические показатели	22.04.02 000 006 301	A1

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	7
1 ОЦЕНКА ВОССТАНОВИМОСТИ И ГОРЯЧЕЙ ПРОЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОРУДНОГО СЫРЬЯ.....	9
1.1 Оценка восстановимости железорудного сырья.....	9
1.2 Оценка горячей прочности железорудного сырья.....	11
2 ВОССТАНОВИМОСТЬ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ОКАТЫШЕЙ .....	14
2.1 Формирование исходных данных и расчет восстановительного газа .....	14
2.2 Расчет материального и теплового балансов .....	15
2.3 Оценка влияния диоксида титана, монооксида железа и оксида магния на восстановимость окатышей.....	16
2.4 Выводы по разделу 2 .....	20
3 ВОССТАНОВИМОСТЬ АГЛОМЕРАТА .....	21
3.1 Влияние повышенного содержания железа на металлургические свойства агломерата.....	21
3.2 Влияние минерального состава агломерата на восстановимость .....	23
3.3 Оценка влияния диоксида титана, монооксида железа и основности агломерата на восстановимость.....	26
3.4 Выводы по разделу 3 .....	27
4 ОЦЕНКА ГОРЯЧЕЙ ПРОЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОРУДНОГО СЫРЬЯ В ЦЕНТРЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СЫРЬЯ АО «ЕВРАЗ НТМК».....	29
4.1 Сущность применяемых методов.....	29
4.2 Метод парной корреляции .....	32
4.3 Оценка влияния химического состава на горячую прочность железорудного сырья.....	33
4.4 Выводы по разделу 4 .....	40
5 ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВОССТАНОВИМОСТИ ЖЕЛЕЗОРУДНОГО СЫРЬЯ В ЦЕНТРЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СЫРЬЯ АО «ЕВРАЗ НТМК» .....	42
5.1 Метод определения конечной степени восстановления $R_{180}$ .....	42
5.2 Метод определения индекса восстановимости до 65% $R_{t65}$ .....	43
5.3 Метод определения индекса восстановимости до 80% $R_{t80}$ при восстановлении под нагрузкой .....	45
5.4 Оценка влияния химического состава на восстановимость железорудного сырья.....	47

5.5 Выводы по разделу 5 .....	51
<b>6 РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНОГО ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ЖЕЛЕЗОРУДНОГО СЫРЬЯ.....</b>	<b>53</b>
6.1 Построение модели с помощью алгоритма Random Forest .....	53
6.2 Расчет горячей прочности и восстановимости по полученным моделям.....	56
6.3 Выводы по разделу 6 .....	58
<b>7 РАСЧЕТ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ЧУГУНА И ШЛАКА .....</b>	<b>60</b>
7.1 Расчет химического состава по базовому варианту .....	61
7.2 Расчет химического состава по оптимальным параметрам.....	66
7.3 Выводы по разделу 7 .....	69
<b>8 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЕКТА.....</b>	<b>71</b>
8.1 Определение изменения показателей производства чугуна после внедрения технологии .....	71
8.2 Расчет изменения себестоимости .....	72
8.3 Расчет условно-годовой экономии.....	73
8.4 Расчет прибыли .....	74
8.5 Расчет показателей фондоотдачи и фондоемкости .....	75
8.6 Расчет рентабельности продукции.....	75
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>77</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....</b>	<b>80</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ КОМПОНЕНТОВ ШИХТЫ ПО БАЗОВОМУ ВАРИАНТУ .....</b>	<b>85</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ КОМПОНЕНТОВ ШИХТЫ ПО РАСЧЕТНОМУ ВАРИАНТУ .....</b>	<b>86</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Любое железорудное сырье представляет собой минеральную композицию железосодержащих фаз, состав, микроструктура и физико-механические свойства которой зависят от химического и фазового состава исходной шихты.

Повышение качественных характеристик железорудных материалов является одним из наиболее эффективных способов улучшения технико-экономических показателей доменного процесса. Качество готовой продукции зависит от целого ряда технологических параметров, одним из которых является горячая прочность железорудного сырья. Сырье должно обладать высокой горячей прочностью и выдерживать без разрушения ряд фазовых превращений при восстановлении в доменной печи вплоть до отделения шлака от металла. Помимо этого, сырье должно обладать хорошей восстановимостью, то есть способностью легко отдавать кислород, связанный в оксиды газообразному восстановителю.

Исследования восстановимости и горячей прочности железорудного сырья являются актуальными и важными в области металлургии по следующим причинам:

- исследования горячей прочности сырья важны для существующего доменного процесса, так как образование мелочи во время восстановления негативно сказывается на газопроницаемости столба шихтовых материалов,
- более высокая восстановимость способствует сокращению времени пребывания железорудного сырья в доменной печи и росту доли косвенного восстановления окислов железа, что приведет к снижению удельного расхода кокса,
- исследования в области восстановимости железорудного сырья способствуют развитию новых технологий и инноваций в металлургической отрасли, может привести к разработке новых методов восстановления и использования рудного сырья.

Химический состав железорудного сырья оказывает существенное влияние на его восстановимость и горячую прочность. Поэтому управление химическим составом позволит подобрать оптимальный состав сырья для наилучших показателей плавки.

Цель данной работы: оценить влияние химического состава железорудного сырья на его горячую прочность и восстановимость и определить оптимальный состав сырья, который не ухудшает качество выплавляемого чугуна и имеет повышенные металлургические свойства.

Для достижения поставленной цели в работе сформулированы следующие основные задачи:

- изучить литературные источники по влиянию химического состава на горячую прочность и восстановимость железорудного сырья,
- оценить восстановимость железорудного сырья с использованием различных восстановительных газов в Центре исследования сырья Центральной лаборатории комбината АО «ЕВРАЗ НТМК» и определить полезные примеси, повышающие восстановимость,
- оценить горячую прочность железорудного сырья в Центре исследования сырья Центральной лаборатории комбината АО «ЕВРАЗ НТМК» и определить полезные примеси, повышающие ее,
- провести анализ результатов исследований по определению горячей прочности и восстановимости железорудного сырья,
- построить модели, способные рассчитывать оптимальные восстановимость и горячую прочность исходя из заданных параметров химического состава каждого из материалов,
- предложить варианты изменения химического состава железорудного сырья для получения оптимального качества,
- рассчитать материальный баланс доменной плавки и состав продуктов плавки с использованием железорудного сырья оптимального состава и оценить качество выплавляемого чугуна.

# 1 ОЦЕНКА ВОССТАНОВИМОСТИ И ГОРЯЧЕЙ ПРОЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОРУДНОГО СЫРЬЯ

Восстановимость является одним из основных металлургических свойств железорудного сырья, которое характеризует способность материала отдавать кислород, связанный в оксиды, газообразному восстановителю [1]. Согласно исследованиям [2] повышение восстановимости в большей степени влияет на снижение удельного расхода кокса доменной плавки, а не на ухудшение прочности агломерата. Применение легковосстановимого железорудного агломерата является одним из аспектов разработки доменного процесса нового поколения, так как увеличение восстановимости шихты на 1% позволяет снизить расход кокса на 4 кг/т чугуна [3].

Помимо восстановимости сырье должно обладать оптимальными прочностными свойствами, чтобы исключить образование мелочи в шахте доменной печи при восстановлении материалов. Мелочь железорудного сырья ухудшает газопроницаемость столба шихты, что негативно сказывается на ходе плавки.

## 1.1 Оценка восстановимости железорудного сырья

Восстановимость железорудных материалов оценивается различными показателями. Так, согласно ISO 7215 под относительной (или фактической) восстановимостью понимается конечная степень восстановления, достигнутая после установленного периода времени и других определенных условий [3], которая определяется по формуле (1):

$$R_{\text{отн}} = \frac{\Delta m}{m}, \quad (1)$$

где  $\Delta m$  – потеря в массе кислорода после 3 ч восстановления, г;

$m$  – масса кислорода, связанного с железом перед восстановлением, г.

Определение восстановимости по  $R_{отн}$  (или  $R_{факт}$ ) аналогично расчету степени косвенного восстановления в доменной печи  $R_i$  (по Банзену и Рейхардту) как отношения количества кислорода, отнятого непрямым путем от железа, к исходному количеству кислорода, связанного с железом [3].

Развитие реакции восстановления монооксида железа газами является определяющим для расхода кокса доменной плавки и оценивается степенью косвенного восстановления по формуле (2), которая не зависит от окисленности шихты и рассчитывается аналогично степени металлизации [4]:

$$r = 100 \cdot \frac{Fe_{мет}}{Fe_{общ}}, \quad (2)$$

где  $Fe_{мет}$  – содержание металлического железа, %;

$Fe_{общ}$  – содержание железа общего, %.

Однако, этот показатель характеризует восстановимость материала лишь на некотором отрезке длительности процесса и предполагает линейное изменение скорости восстановления, что вносит погрешности при его использовании для построения математических моделей плавки. В ходе математического моделирования доменного процесса показатели восстановимости  $R_{факт}$ ,  $R_{отн}$ ,  $r$  непосредственно не применяются. Результаты лабораторных исследований восстановимости железорудных материалов являются базовыми для определения скорости их восстановления в условиях плавки [4].

Для определения восстановимости железорудных материалов используется методика согласно ГОСТ 17212-84. Восстановление производится в вертикальной реакционной трубе, помещенной в электропечь. Навеска рудного материала крупностью 10,0-12,5 мм массой 500 г загружается в реакционную трубу, которая подвешивается к весоизмерительному устройству. Навеска продувается газом с расходом  $30 \pm 1$  кубических дециметров в минуту. Газ имеет следующий состав:  $CO = 33\%$ ,  $N_2 = 65\%$ ,

остальное  $H_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ . В процессе продувки навески газом печь нагревается в начале до  $600\text{ }^\circ\text{C}$  в течение 40 минут, а затем до  $1100\text{ }^\circ\text{C}$  в последующие 180 минут. В процессе нагрева навески и продувки ее газом-восстановителем производится регистрация потерь массы кислорода. Восстановимость определяется как отношение массы отнятого кислорода к массе первоначально связанного кислорода, выраженное в процентах. Железорудные материалы хорошей восстановимости имеют этот показатель в пределах 60-70% [5].

## **1.2 Оценка горячей прочности железорудного сырья**

Определяющими требованиями для высоких физико-механических свойств железорудных материалов являются содержание в них железа, оксида кремния и степень офлюсования.

Необходимое требование доменщиков – получение прочного для доменного передела сырья не достигается по двум основным причинам:

- на стадии термообработки не происходит полного взаимодействия компонентов шихты и сырье разрушается при восстановлении уже на верхних горизонтах доменной печи,

- при полном взаимодействии компонентов шихты в конечном составе продукта образуется минеральная связка, физико-химические свойства которой не соответствуют порядку превращения рудных и силикатных фаз сырья от начала его восстановления до полного разделения на шлак и металл, что сильно затрудняет ведение процесса в доменной печи [6].

Высокую горячую прочность имеет композиция рудной и силикатной фазы. Оптимальным с точки зрения горячей прочности является сочетание минеральных фаз, обладающих разными физико-химическими свойствами. Фазы должны иметь разную температуру превращения, и чем больше этот температурный интервал, тем более прочным окажется сырье. Самой прочной при восстановлении является композиция из трех фаз, например, гематит (или магнетит), ферритная фаза и стекло. В такой композиции при восстановлении существует четкая последовательность превращений фаз и потерь ими прочности: рудная фаза – феррит-силикатная. При восстановлении

и разрушении контактов между зернами рудной фазы прочность сырья сохраняется за счет ферритной и силикатной фаз. При восстановлении ферритной фазы носителем прочности остается силикатная фаза. Затем на месте ранее существовавших рудных и ферритных фаз образуется металлический каркас, и только следом за образованием металлической губки размягчается, плавится и отделяется от металла силикатный расплав, появившийся на месте силикатной связи. Такое сырье во всем интервале температур от начала восстановления рудной фазы до отделения металла от шлака имеет высокие прочностные свойства [7].

В шихте доменной печи на АО «ЕВРАЗ НТМК» используют смесь трех видов железорудного сырья – агломерат и окатыши КГОК, а также железоблюк ВГОК. В идеальных условиях разные виды сырья должны обладать одинаковыми или близкими восстановительно-прочностными свойствами и, главное, чтобы фазы-связки имели близкие температурные интервалы разупрочнения и плавления. Только при соблюдении этих условий в определенном интервале температур будут восстанавливаться рудные фазы сырья, размягчаться и плавиться силикатные составляющие шихты. Шихтовая смесь с одинаковой или близкой температурой фазовых превращений будет иметь в доменной печи узкую зону вязкопластического состояния, строго фиксированную по уровню температур и высоте восстановительного агрегата.

В реальных же условиях в шихте используют нескольких видов подготовленного сырья с разными свойствами связок, что усложняет условия доменной плавки, приводя к увеличению протяженности зоны вязкопластического состояния.

Однако, несмотря на высокие требования по горячей прочности сырья, в каждом конкретном случае необходимо исходить из технологических требований к составу и свойствам конечного доменного шлака, так как состав шлака оказывает решающее значение на ход плавки. Таким образом, вопрос о фазовом составе компонентов шихты и повышении горячей прочности сырья

путем изменения фазового состава всегда должен решаться с учетом этой обратной связи.

Исходя из требуемой основности и химического состава доменного шлака, необходимо осуществлять такой подбор компонентов сырья, который позволит получать железорудное сырье заданного фазового состава, физико-химических и прочностных свойств [7].

Согласно источнику [8] поставленные эксперименты по определению горячей прочности агломерата позволили установить следующее:

- восстановительные процессы являются определяющими в разупрочнении агломерата,

- максимальное разупрочнение наблюдается при степени восстановления 25-40%, т.е. на этапе восстановления  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4$ , что соответствует температуре 500 °С [9] (при более высоких температурах разупрочнение замедляется, а затем при температурах > 900 °С прочность даже увеличивается),

- разупрочнение материалов при восстановлении оксидом углерода происходит в большей мере, чем при восстановлении водородом.

Главной причиной снижения прочности железорудных материалов являются затруднения, связанные с перестройкой кристаллических решеток оксидов железа в ходе восстановления. Подобная перестройка, протекающая при умеренных температурах, создает в объеме куска значительные внутренние напряжения с образованием трещин и последующим разрушением.

## **2 ВОССТАНОВИМОСТЬ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ОКАТЫШЕЙ**

Для определения восстановимости и степени металлизации титаномагнетитовых окатышей, получаемых из руд Качканарского месторождения принято решение воспользоваться методами и технологией прямого восстановления железа.

Для получения железа прямого восстановления из железорудных окатышей в качестве восстановителя используется газ ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ), твердый углерод или их применяют совместно, температура процессов составляет около  $1000\text{ }^\circ\text{C}$ . Кроме того, разработаны технологии жидкофазного восстановления железа, процессы в кипящем шлаковом слое [10].

В перспективе на Урале основной рудной базой черной металлургии России будет титаносодержащее сырье, имеющее в своем составе, кроме железа, ванадий и титан. Одной из задач, над которой работают ученые и металлурги, является получение железа прямого восстановления из титаномагнетитовых руд, в частности, Качканарских окатышей [11]. В данном случае технология прямого восстановления позволит определить степень восстановления ЖРС Качканарского ГОКа.

Вопросы разработки технологических основ рациональной схемы производства железа прямого получения из качканарских титаномагнетитов были неоднократно рассмотрены. Исследование НИТУ «МИСиС», показали возможность извлечения  $\text{V}_2\text{O}_5$  при металлизации в процессе прямого восстановления и плавке в дуговой сталеплавильной печи титаномагнетитовых руд Качканарского месторождения [12].

### **2.1 Формирование исходных данных и расчет восстановительного газа**

В качестве входных параметров задаются: химический состав исходных окатышей, степень металлизации (при этом допускается, что  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  в металлизированных материалах отсутствует). Для химического состава задаются % (мас.):  $\text{Fe}_{\text{общ}}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{SO}_3$ .

Расчет металлического железа и других компонентов ведется на 100 кг окисленных окатышей. Химический состав металлизированных окатышей рассчитывается путем деления содержания компонентов в исходных окатышах на массу металлизированного продукта. Ввиду этого в расчет также могут быть введены такие компоненты, как  $TiO_2$  и  $V_2O_5$ , присутствующие в титаномагнетитовом сырье.

Расчет ведется на 100 кг металлизированного продукта. Восстановление оксидов других элементов, кроме оксидов железа, не учитывается, поэтому массу кислорода, переходящего в газовую фазу, можно найти по разности масс исходных и металлизированных окатышей. С учетом степени использования восстановительной способности газа ( $CO$  и  $H_2$ ) в процессе расчета можно определить его объем, расход и массу входящих компонентов ( $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2$ ,  $H_2O$ ,  $N_2$ ,  $CH_4$ ). Для расчета состава колошникового газа рассчитывают количество переходящего в него водорода, образующихся водяных паров, оксида углерода, диоксида углерода, азота, метана, объем газа [13].

## **2.2 Расчет материального и теплового балансов**

Статьи прихода материального баланса – исходные окатыши, восстановительный газ, природный газ. Статьи расхода – металлизированные окатыши, колошниковый газ. Статьи прихода теплового баланса – тепло восстановительного газа, тепло исходных окатышей, прочее (тепло, вносимое природным газом; тепло для разложения  $CO$ ). Статьи расхода – тепло металлизированных окатышей, тепло колошникового газа, тепло на восстановление, потери тепла [14].

Исходные данные – химический состав окатышей, изготовленных из титаномагнетитового концентрата АО «ЕВРАЗ КГОК», в составе которых присутствуют  $TiO_2$  и  $V_2O_5$ . Процесс металлизации проведен с использованием процесса Midrex на АО «ОЭМК им. А.А. Угарова». Степень металлизации принималась фактическая: для пробы №1 – 92,10%; пробы №2 – 94,60%; пробы №3 – 93,40%; пробы №4 – 93,90%.

В опыте были приняты следующие допущения: в процессе металлизации восстановление фосфора, кремния, марганца и серы не происходит, вынос пыли отсутствует. Степень использования CO составляет 36,36%; состав восстановительного газа: 2,5% CO<sub>2</sub>; 57,4% H<sub>2</sub>; 36,4% CO; 2,3% N<sub>2</sub>; 1,4% CH<sub>4</sub> [14]. Химический состав металлизированных титаномагнетитовых окатышей представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Состав исходных и металлизированных окатышей [14, с. 40]

Проба	Fe <sub>общ</sub>	Fe <sub>мет</sub>	FeO	CaO	SiO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	MgO	S	C
Исходные окатыши											
1	61,40	–	2,30	1,34	3,94	0,52	2,53	2,50	2,24	0,004	–
2	62,00	–	2,00	1,22	3,55	0,58	2,28	2,59	2,14	0,004	–
3	62,40	–	1,90	1,17	3,30	0,44	2,16	2,42	1,92	0,004	–
4	61,00	–	2,00	1,38	3,70	0,57	2,40	2,63	2,10	0,004	–
Металлизированные окатыши (факт)											
1	78,70	72,50	–	1,94	5,02	0,74	3,42	3,40	3,41	0,006	2,47
2	79,80	75,50	–	1,96	4,41	0,77	3,39	3,50	3,21	0,006	1,88
3	78,90	73,70	–	1,60	4,27	0,77	3,40	3,58	3,16	0,004	3,45
4	78,30	73,50	–	2,09	4,81	0,76	3,38	3,66	3,29	0,005	3,08
Металлизированные окатыши (расчет)											
1	79,32	73,05	–	1,73	5,09	0,75	3,27	3,23	3,24	0,005	2,47
2	80,67	76,31	–	1,59	4,62	0,75	2,97	3,37	2,78	0,005	1,88
3	81,47	76,09	–	1,54	4,34	0,75	2,84	3,18	2,52	0,005	3,45
4	79,87	75,00	–	1,81	4,84	0,75	3,14	3,34	2,75	0,005	3,08

Как видно из таблицы содержание железа металлического в пробах от 72,5 до 76,31%, соответственно степень металлизации можно рассчитать, как отношение Fe<sub>мет</sub>/Fe<sub>общ</sub>. Наибольшая степень металлизации у пробы №2, наименьшая у пробы №1.

### **2.3 Оценка влияния диоксида титана, монооксида железа и оксида магния на восстановимость окатышей**

Для оценки влияния диоксида титана на восстановимость окатышей Собственно-Качканарского месторождения были отобраны лабораторные пробы окатышей с различным содержанием диоксида титана (6 проб) [15]. Для выяснения фазовых составляющих окатышей использовали метод

рентгенофазового анализа. Исследование выполнено на оборудовании ЦКП «Урал-М» в Институте металлургии Уральского отделения РАН.

Количественный фазовый анализ проводили методом полнопрофильного уточнения с использованием программы TOPAS [15].

Фазовый состав окатышей представлен в таблице 2.

Таблица 2 – Фазовый состав лабораторных окатышей [15, с. 28]

Проба	Фаза	Содержание, % (мас.)
1/0	Гематит Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	87,19
	Магнетит Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	2,84
	Корунд Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,80
	Геденбергит CaFeSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	0,89
	Диопсид CaMg(Si <sub>2</sub> O <sub>6</sub> )	6,92
	Кварц SiO <sub>2</sub>	0,36
1/20	Гематит Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	85,01
	Магнетит Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	7,67
	Корунд Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,51
	Геденбергит CaFeSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	1,04
	Диопсид CaMg(Si <sub>2</sub> O <sub>6</sub> )	3,75
	Рутил TiO <sub>2</sub>	0,70
1/40	Гематит Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	79,06
	Магнетит Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	10,44
	α-Fe	0,24
	Диопсид CaMg(Si <sub>2</sub> O <sub>6</sub> )	5,03
	Ильменит FeTiO <sub>2</sub>	1,37
	MnO	0,15
	Корунд Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,73
	Геденбергит CaFeSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	1,59
1/60	Гематит Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	36,12
	Магнетит Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	3,48
	Диопсид CaMg(Si <sub>2</sub> O <sub>6</sub> )	6,04
	MnO	0,46
	Пентаоксид V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1,90
	Корунд Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,22
	Гематит Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	89,60
1/80	Кварц SiO <sub>2</sub>	0,27
	Корунд Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,94
	Геденбергит CaFeSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	2,30
	Вюстит FeO	0,32
	α-Fe	0,22
	Диопсид CaMg(Si <sub>2</sub> O <sub>6</sub> )	2,48
	0/1	Гематит Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Магнетит Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>		2,86
Рутил TiO <sub>2</sub>		1,48
Диопсид CaMg(Si <sub>2</sub> O <sub>6</sub> )		10,06
α-Fe		0,27

В целом окатыши представлены гематитом (от 77 до 89%), магнетитом (от 2,84 до 10,44%), сложным диопсидом (от 2 до 10%), а также в очень малых количествах кварцем, геденбергитом, корундом, рутилом, ильменитом,  $\alpha$ -Fe, вюститом.

Для расчетного анализа использована балансовая логико-статистическая модель доменного процесса, основанная на использовании материальных и тепловых балансов, дополненных расчетами тепло- и массообмена, блоком учета неравномерности распределения газа по радиусу колошника и статистическими данными влияния различных факторов на показатели работы доменной печи [14]. Содержание  $TiO_2$  в шлаке возрастает с 10,55% с использованием окатышей №1/0 (текущее производство) до 13,34% в окатышах №0/1 (максимальное содержание  $TiO_2$  в исходном сырье). При введении высокотитанистых окатышей в печь при отсутствии компенсирующих мероприятий по снижению  $TiO_2$  в шлаке возможно использовать до 100% окатышей №0/1, 1/20, 1/40 до достижения  $TiO_2$  в шлаке максимум 11,4% [15].

Повышение прочностных свойств и восстановимости сопровождается ростом содержания монооксида железа в обожженных окатышах. Рост содержания монооксида железа с уменьшением времени окислительного обжига обусловлен недоокислением первичного магнетита, а повышение температуры приводит к диссоциации гематита до магнетита.

Окатыши, малоокисленные при 1000 °С, имеют при заданной температуре большее количество монооксида железа, чем полностью окисленные перед высокотемпературным обжигом. Однако зависимости прочностных свойств при восстановлении от времени окислительной выдержки не выявлены. По-видимому, это обусловлено следующим: основным фактором, определяющим появление необходимого количества шлака для экранирования рудных зерен от непосредственного контакта с восстановительным газом, является температура обжига. Небольшого количества магнетита, независимо от его происхождения, достаточно для

обогащения расплава двухвалентным железом, способствующим застыванию оксидной жидкости в виде слабовосстановимого стекла. Окатыши с такой связкой в меньшей степени подвержены разрушению при восстановлении [16].

В процессе разложения известковой составляющей доломитизированного известняка  $\text{CaCO}_3$  появившийся  $\text{CaO}$  на контакте с оксидом железа приводит к образованию ферритной фазы. При  $1150\text{ }^\circ\text{C}$  на месте исходного флюса наблюдается механическая смесь кристаллов магниевой шпинели (60,1% Fe, 13,0% MgO и 2,5% CaO) и полукальциевого феррита (59,4% Fe, 14,5% CaO).

В интервале температур  $1150\text{-}1250\text{ }^\circ\text{C}$  появляется первичный расплав, состав которого определяется составом и количеством легкоплавких силикатов концентрата. Этот расплав интенсифицирует процесс низкотемпературного спекания за счет вовлечения в реакцию минералообразования более крупных зерен концентрата. При отсутствии легкоплавких силикатов в составе железорудной составляющей шихты при данных уровнях температуры наблюдается только твердофазное спекание. При наличии оксида кальция температура появления жидкой фазы снижается.

При  $1200\text{-}1250\text{ }^\circ\text{C}$  в окатышах появляется железосиликатный расплав в результате плавления силикоферрита, ассимиляции им первичного силикатного расплава, кварца шихты и остатков флюса. Окатыши при  $1250\text{ }^\circ\text{C}$  имеют ограниченное развитие силикатного расплава. Микрообъемы железосиликатного расплава образуются одновременно во всем окатыше, однако взаимодействие как между объектами расплава, так и между расплавом и твердыми фазами окатыша ограничено в силу небольшого количества расплава. Именно в этом интервале температур появляется затормаживающее влияние оксида магния на формирование фазового состава окатышей. Это связано с тем, что MgO введенный в состав шихты окатышей вместо CaO, ограничивает процесс ферритообразования и, как следствие, силикатообразования, и приводит к появлению в составе окатышей

магнезиальной шпинели, которая, как и гематит, является высокотемпературной рудной фазой.

В составе окатышей оксид магния приводит к росту количества тугоплавких рудных фаз (магнезиальной шпинели) за счет уменьшения количества легкоплавких.

С другой стороны, наличие в окатышах тугоплавкой шпинели обеспечивает более высокий уровень температуры размягчения магнезиальных окатышей в процессе восстановления, что говорит о повышенной горячей прочности окатышей [18, 19].

## **2.4 Выводы по разделу 2**

Увеличение содержания диоксида титана в окатышах по мере увеличения количества, вводимого в них концентрата с повышенным содержанием  $TiO_2$  (до предельного содержания  $TiO_2$  в шлаке 11,4%), не вызывает ухудшения в качестве подготовки железорудных окатышей к доменной плавке. Однако сведений, указывающих на повышение восстановимости окатышей, с ростом количества диоксида титана в них не имеется.

Низкие металлургические свойства не полностью окисленных окатышей связаны с их зональным строением. Полностью окисленные окатыши однородны, прочны и имеют более высокую восстановимость по сравнению с не полностью окисленными окатышами.

Оксид магния положительно влияет на горячую прочность окатышей, так как образует тугоплавкие шпинели, способные обеспечивать более высокий уровень температуры размягчения. Однако тугоплавкие шпинели негативно влияют на восстановимость окатышей.

### **3 ВОССТАНОВИМОСТЬ АГЛОМЕРАТА**

Методика определения восстановимости агломератов весьма многообразна, что затрудняет сравнение результатов, полученных разными исследователями. Помимо этого, небольшое отступление в методе проведения опыта, даже в пределах одной лаборатории с одним и тем же материалом или недостаточный опыт экспериментатора в работе каким-либо из методов приводит к получению разных числовых значений восстановимости.

При определении восстановимости чаще всего воспроизводят процессы восстановления, происходящие в доменной печи. Однако для сравнительной оценки восстановимости агломератов такое воспроизводство совершенно не обязательно. Важно иметь возможность простым и быстрым методом, легко осуществимым в условиях обычной заводской лаборатории, получить сравнительные цифры, характеризующие восстановимость агломератов. При этом сравнимость цифр должна обеспечиваться не в пределах одной лаборатории или одного типа агломерата, а для разных лабораторий и применительно к различным агломератам. Лишь в этом случае показателем восстановимости можно будет пользоваться так же, как оценкой по химическому составу и физической характеристике.

Основное различие применяемых в практике методов заключается в том, какой газ используется для восстановления: водород, окись углерода или же смесь их, иногда с добавками паров воды и углекислоты. Для сравнительной оценки восстановимости нет надобности прибегать к сложным смесям газов, отображающих по своему составу газ доменной печи. Достаточно воспользоваться стандартными смесями, применяемыми в большинстве лабораторий.

#### **3.1 Влияние повышенного содержания железа на металлургические свойства агломерата**

Для исследования были подготовлены три вида концентрата, отличающиеся различным содержанием железа: базовый (база) – 66,6%,

экспериментальный 1 (эксп. 1) – 68,0%, экспериментальный 2 (эксп. 2) – 69,2% [20]. Характеристика исследуемых концентратов приведена в таблице 3.

Таблица 3 – Физико-химический состав железорудного концентрата [20, с. 1034]

Показатель	База	Эксп. 1	Эксп. 2
Химический состав, %:			
Fe <sub>общ</sub>	66,60	68,00	69,20
FeO	28,70	28,50	30,80
SiO <sub>2</sub>	6,30	4,90	3,40
CaO	0,22	0,22	0,12
MgO	0,70	0,52	0,32
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,20	0,30	0,15
TiO <sub>2</sub>	<0,02	<0,02	<0,02
MnO	<0,02	<0,02	<0,02
Гранулометрический состав, %:			
0,4–0,8 мм	0,15	0	0
0,2–0,4 мм	0,46	0	0
0,1–0,2 мм	2,86	1,17	0,26
0,071–0,1 мм	3,42	2,23	1,12
0,045–0,071 мм	14,32	10,42	15,49
–0,045 мм	78,79	86,18	83,13
Удельная поверхность, см <sup>2</sup> /г	1576	1999	2015

Из сопоставления химических составов (см. таблицу 3) следует, что для базового варианта характерно минимальное содержание железа – 66,6% при максимальном содержании SiO<sub>2</sub> – 6,3%; для эксп. 1 – 68,0 и 4,9%; для эксп. 2 – 69,2 и 3,4% соответственно. Суммарное содержание прочих компонентов (оксидов магния, алюминия, кальция, щелочных металлов) не превышает 2% в базовом концентрате, 1,5% в экспериментальном 1 и 1% в концентрате самого высокого качества (эксп. 2) [20].

Компонентный состав железорудной смеси для всех этапов испытаний был неизменен: железорудный концентрат – 78,3%, аглоруда – 8,0%, известь – 5,5%, аглодобавки (шламы, пыли, окалина) – 8,2%. Компонентный состав агломерационных шихт для всех этапов испытаний отличался только расходом флюсов и железорудной смеси для поддержания одинаковой основности для каждого этапа испытания. Содержание компонентов аглошихты составило: возврата агломерата – 25%; Мп-известняка – 1,9%; железорудного сырья – от 56,1 до 62,03%; доломита – от 6,54 до 6,8%; известняка – от 0,87 до 7,0%; коксовой мелочи – от 3,4 до 3,5% [20].

Исследования на восстановимость и разрушаемость при восстановлении проводили согласно требованиям ISO 4696-1. Данная часть ISO 4696-1 описывает метод определения прочности руд после восстановления во вращающемся барабане. Навеска восстанавливается в неподвижном слое при температуре 500 °С, что характерно для низкотемпературной зоны доменной печи [20, 21]. Показатели горячей прочности агломератов по ISO 4696-1 приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Показатели горячей прочности агломератов [20 с. 1036]

Железорудный материал	RDI <sub>+6,3</sub>	RDI <sub>-3,15</sub>	RDI <sub>-0,5</sub>
Агломерат из концентрата с содержанием железа 66,6% (база)			
Агломерат основностью 1,6	81,90	6,57	1,14
Агломерат основностью 1,8	82,87	6,33	1,11
Агломерат основностью 2,0	86,73	4,47	0,91
Агломерат из концентрата с содержанием железа 68,0% (эксп. 1)			
Агломерат основностью 1,6	86,48	4,96	0,98
Агломерат основностью 1,8	87,99	4,48	0,94
Агломерат основностью 2,0	90,89	3,75	0,81
Агломерат из концентрата с содержанием железа 69,2% (эксп. 2)			
Агломерат основностью 1,6	85,17	5,79	1,07
Агломерат основностью 1,8	88,19	4,82	0,96
Агломерат основностью 2,0	93,58	2,43	0,61

При повышении содержания железа показатель RDI по классу +6,3 мм увеличился на 5,6% для эксп. 1 и на 6,2% для эксп. 2, а по классам –3,15 мм и –0,5 мм снизился на 24% для эксп. 1 и на 25% для эксп. 2. Соответственно повышение содержания железа также привело к повешению восстановимости агломерата. Показатель RDI по классу +6,3 мм увеличился на 2,1%, а по классам –3,15 мм и –0,5 мм снизился на 9,7 и 5,6% при повышении основности с 1,6 до 1,8 ед. и на 7,0; 38,5; 26,9% соответственно при повышении основности с 1,6 до 2,0 ед. [20].

### 3.2 Влияние минерального состава агломерата на восстановимость

В качестве объектов исследования были выбраны агломераты, данные о качестве которых представлены в таблице 5. Дифференциация проб по методам исследования была проведена с учетом того, что пробы №1 и №9 являются наиболее перспективными для моделирования доменной плавки. Проба №1 позволяет оценить влияние на доменный процесс использования

концентрата ОЖК с содержанием железа 65,6%, а проба №9 – концентрата ОЖК с содержанием железа 66,9%. Проба №6 является базовой [22].

Таблица 5 – Данные об исследованных пробах агломератов [22, с. 4]

Параметр	Номер опыта		
	1	6	9
Основность	1,42	1,45	1,35
Содержание, %:			
Fe	53,50	52,70	54,70
FeO	13,80	13,10	12,90
CaO	12,80	13,50	11,20
SiO <sub>2</sub>	9,00	9,30	8,30
MgO	1,21	1,15	1,13
S	0,07	0,04	0,03
Степень восстановления по ГОСТ 17212-84, %	48,7	43,9	37,7

Анализ полученных результатов показал, что восстановимость агломератов изменяется в относительно узких пределах, при этом агломерат из концентрата ОЖК с содержанием железа 65,6% имеет более высокое значение степени восстановления.

Для анализа причин такого различия металлургических свойств были проведены исследования структуры агломератов [23]. Минеральный состав кристаллической составляющей проб агломератов представлен в таблице 6.

Таблица 6 – Минеральный состав кристаллической составляющей проб агломератов [23, с. 51]

Номер пробы	Магнетит Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Гематит Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ларнит Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	Пироксен CaFeSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	Точно не диагностированный сложный оксид
1	59	22	15	4	Не обнаружен
6	66	14	15	4	1
9	60	22	14	3	1

Из данных таблицы 6 видно, что минеральный состав проб агломерата относительно однообразен, при этом проба №6, полученная из магнетитового концентрата, обладает меньшей окисленностью: содержание в ней магнетита выше на 6-7%, а гематита ниже на 8% при относительно одинаковом содержании ларнита.

В ходе исследования были проанализированы гематит и магнетит в основных структурах внутренней части и во внешней кайме. Состав как магнетита, так и гематита в исследованных пробах относительно стабилен,

при этом магнетит содержит существенное количество примесей, что указывает на его формирование из расплава. Вариативность содержания примесей в магнетите существенно выше, чем в гематите [23].

Различия в микроструктуре проб, полученных из концентрата мокрой магнитной сепарации (ММС) и ОЖК, следующие [23]:

– пробы, полученные из ОЖК, имеют существенно больше изоморфных примесей как в структуре магнетита и гематита, так и в составе связки, а также характеризуются более высокой вариативностью количества и состава примесей, что свидетельствует о более высокой степени расплавления шихты при агломерации,

– особенностью состава стекловидной фазы является ее более высокая основность для проб №6 и 9 ( $\text{CaO/SiO}_2 = 1,29$ ) по сравнению с пробой №1 ( $\text{CaO/SiO}_2 = 1,17$ ).

Для оценки влияния замены магнетитового концентрата на концентрат ОЖК было проведено моделирование доменной плавки с использованием логико-статистической модели ИМет УрО РАН. Расчет проведен для вариантов с использованием базового и экспериментальных агломератов при прочих равных условиях.

Анализ расчетных данных показал, что использование концентрата ОЖК позволяет повысить технико-экономические показатели доменной плавки. При этом повышается производительность и снижается удельный расход кокса. Улучшение показателей доменной плавки достигается использованием агломератов с более высокими металлургическими свойствами: высоким содержанием железа и более высокой восстановимостью. Показатели металлургических свойств агломерата из концентрата ОЖК с содержанием железа в комплексе выше, чем агломерата из концентрата ММС. Это свидетельствует о большей ценности концентрата ОЖК как металлургического сырья. Использование агломерата из концентрата ОЖК позволит повысить эффективность доменной плавки (по

сравнению с концентратом ММС) за счет более высокой восстановимости агломератов из концентрата ОЖК [23].

### **3.3 Оценка влияния диоксида титана, монооксида железа и основности агломерата на восстановимость**

Установлено также, что наилучшими металлургическими свойствами обладает агломерат основностью 2,0-2,3. Для спекания шихта должна содержать 4% С при высоте слоя 330 мм, чтобы обеспечить содержание монооксида железа не выше 11,0-11,5%. Ферритная связка обеспечивает высокую восстановимость агломерата основностью 2,0-2,3. Для того чтобы обеспечить требуемую основность доменного шлака, агломерат должен проплавляться в смеси с неофлюсованными окатышами. При использовании на НТМК всего качканарского сырья соотношение масс окатышей и агломерата в шихте доменных печей составит 3:2 соответственно [17].

С помощью модели окускования железорудного сырья [16], были рассчитаны химические составы агломератов из концентратов ТМК (текущего концентрата Гусевогорского месторождения) и ВТК (высокотитанистого концентрата Гусевогорского месторождения, близкого по составу к концентрату Собственно-Качканарского месторождения) с шагом 20% (таблица 7). Текущий алгоритм модуля позволяет рассчитать тепловой и материальный балансы, среднюю температуру спека на выходе процесса, содержание целевого компонента [24, 25].

Таблица 7 – Химический состав проб агломератов [24, с. 158]

Элемент	1А	2А	3А	4А	5А	6А
Fe <sub>общ</sub>	55,50	56,05	56,59	57,14	57,69	58,26
Fe <sub>мет</sub>	0	0	0	0	0	0
FeO	9,80	9,80	9,80	9,80	9,80	9,80
CaO	9,51	8,97	8,44	7,91	7,37	6,83
MgO	2,16	2,16	2,16	2,16	2,16	2,16
SiO <sub>2</sub>	4,13	3,90	3,67	3,44	3,21	2,97
TiO <sub>2</sub>	2,33	2,47	2,60	2,74	2,87	3,01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,70	2,53	2,35	2,18	2,00	1,87
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,51	0,52	0,55	0,57	0,60	0,62
MnO	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
MnO <sub>2</sub>	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
SO <sub>3</sub>	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
C <sub>нел</sub>	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Основность CaO/ SiO <sub>2</sub>	2,30					

Были рассчитаны показатели доменной плавки на ДП-5 АО «ЕВРАЗ НТМК» с применением высокотитанистых агломерата и окатышей. При работе доменной печи на 100% агломерата и окатышей из концентрата Собственно-Качканарского месторождения содержание TiO<sub>2</sub> в шлаке составит 15,45%, что не скажется негативно на восстановимости высокотитанистого агломерата [24, 26, 27].

### 3.4 Выводы по разделу 3

По результатам исследований использования железорудных концентратов с повышенным содержанием Fe (68,0-69,2%) и пониженным содержанием SiO<sub>2</sub> (3,4-4,9%), а также с изменением показателя основности агломерата (1,6; 1,8 и 2,0 ед.) по сравнению с базовым концентратом (66,6% Fe; 6,3% SiO<sub>2</sub>) можно сделать следующие выводы:

- повышение содержания железа в концентрате и основности агломерата улучшает качественно-количественные показатели плавки,
- увеличение основности агломерата и его производство из магнетитового концентрата с повышенным содержанием железа улучшает показатели RDI при низкотемпературном восстановлении, что также увеличивает восстановимость агломерата,

– показана возможность и целесообразность повышения качественных показателей железорудного концентрата до значений 69,2% Fe, 3,4% SiO<sub>2</sub>, что эффективно скажется на восстановимости.

С повышением монооксида железа в составе агломерата восстановимость его повышается, как и в случае с железорудными окатышами.

Увеличение содержания диоксида титана в агломерате, по мере увеличения количества вводимого в него концентрата с повышенным содержанием TiO<sub>2</sub>, не вызывает ухудшения в качестве агломерата, а также не снижает его восстановимости.

## **4 ОЦЕНКА ГОРЯЧЕЙ ПРОЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОРУДНОГО СЫРЬЯ В ЦЕНТРЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СЫРЬЯ АО «ЕВРАЗ НТМК»**

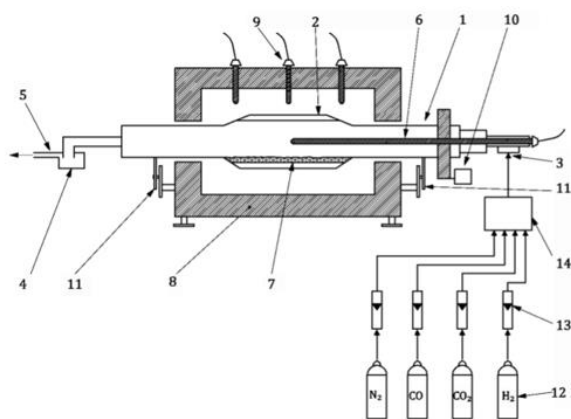
В Лаборатории металлургических испытаний Центральной лаборатории комбината проводились исследования по определению горячей прочности агломерата и железорудных окатышей производства Качканарского ГОКа, а также железоблюса производства Высокогорского ГОКа.

Для оценки горячей прочности железорудного сырья были взяты следующие показатели:

- показатели разрушения  $LTD_{+6,3}$ ,  $LTD_{-3,15}$ ,  $LTD_{-0,5}$  при восстановлении при низких температурах с помощью динамического метода,
- показатели низкотемпературного восстановления-измельчения  $RDI_{+6,3}$ ,  $RDI_{-3,15}$ ,  $RDI_{-0,5}$  при статическом методе восстановления.

### **4.1 Сущность применяемых методов**

Для определения показателей разрушения при восстановлении при низких температурах с помощью динамического метода применяется стандарт ISO 13930 [28]. Навеску железорудного сырья массой 500 г изотермически восстанавливают во вращающейся восстановительной трубке при температуре 500 °С используя газ восстановитель в течение 60 минут. Восстановительная трубка имеет на внутренней поверхности четыре равномерно расположенные стальные подъемники углов, 540 мм в длину, 20 мм в высоту и 4 мм в толщину. Скорость вращения трубки 10 об/мин. Диапазон размеров окатышей, агломерата и железоблюса должен составлять от 10 до 12,5 мм. Схема испытательной установки представлена на рисунке 1.



1 – восстановительная трубка; 2 – подъемники (четыре); 3 – вход газа; 4 – пылеуловитель; 5 – выход газа; 6 – термопара для измерения температуры восстановления; 7 – навеска; 8 – электрическая печь; 9 – термопары для регулировки температуры печи; 10 – оборудование для вращения (электродвигатель); 11 – опорные колеса трубки; 12 – газовые цилиндры; 13 – приборы учета потока газа; 14 – смешительная камера.

Рисунок 1 – Установка для нагрева и восстановления пробы при динамическом методе [28, с. 14]

В качестве газа восстановителя выступает смесь, состоящая из 20% CO, 20% CO<sub>2</sub>, 58% N<sub>2</sub> и 2% H<sub>2</sub>. Скорость подачи газа составляет 20 л/мин.

По окончании восстановления навеску взвешивают с точностью до 0,01 г. Далее производят рассев пробы на ситах с размером ячеек 6,3 мм, 3,15 мм и 0,5 мм. Показатели разрушения определяются по формулам (3)–(5):

$$LTD_{+6,3} = \frac{m_1}{m_0} \cdot 100; \quad (3)$$

$$LTD_{-3,15} = \frac{m_0 - (m_1 + m_2)}{m_0} \cdot 100; \quad (4)$$

$$LTD_{-0,5} = \frac{m_0 - (m_1 + m_2 + m_3)}{m_0} \cdot 100, \quad (5)$$

где  $m_0$  – масса навески после восстановления, г;

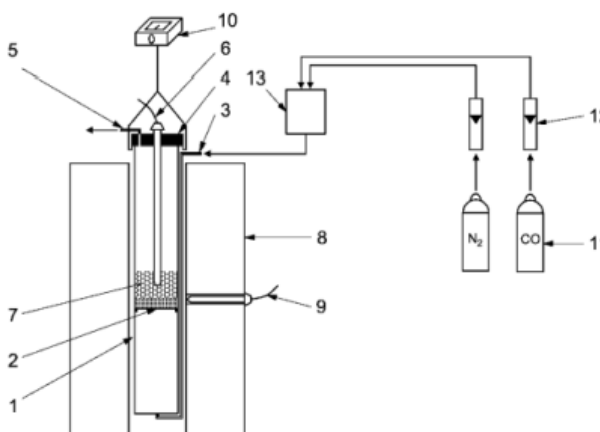
$m_1$  – масса фракции больше 6,3 мм, г;

$m_2$  – масса фракции больше 3,15 мм, г;

$m_3$  – масса фракции больше 0,5 мм, г.

Результаты измерений регистрируются с точностью до второго знака после запятой.

Для определения показателей низкотемпературного восстановления-измельчения при статическом методе восстановления применяется стандарт ISO 4696-1 [29]. Навеску железорудного сырья массой 500 г изотермически восстанавливают в неподвижном слое при температуре 500 °С используя газ-восстановитель в течение 60 минут. Восстановительная трубка изготовлена из не образующего окалину жароустойчивого металла, выдерживающая температуру выше 900° С. Перфорированная пластина имеет толщину 4 мм и диаметр на 1 мм меньше внутреннего диаметра трубы. Отверстия в пластине диаметром от 2 мм до 3 мм. Диапазон размеров окатышей, агломерата и железофлюса должен составлять от 10 до 12,5 мм. Схема испытательной установки представлена на рисунке 2.



1 – стенка восстановительной трубки; 2 – перфорированная пластина; 3 – вход газа; 4 – крышка; 5 – выход газа; 6 – термопара для измерения температуры восстановления; 7 – навеска; 8 – электрическая печь; 9 – термопары для регулировки температуры печи; 10 – весы; 11 – газовые цилиндры; 12 – приборы учета потока газа; 13 – смесительная камера.

Рисунок 2 – Установка для нагрева и восстановления пробы при статическом методе [29, с. 14].

Как и при динамическом методе в качестве газа-восстановителя выступает смесь, состоящая из 20% CO, 20% CO<sub>2</sub>, 58% N<sub>2</sub> и 2% H<sub>2</sub>. Скорость подачи газа составляет 20 л/мин.

По окончании восстановления навеску взвешивают с точностью до 0,01 г и помещают в галтовочный барабан. Внутри барабана крепятся два равноудаленных стальных толкателя длиной 200 мм, высотой 20 мм и толщиной 2 мм. Барабан совершает 300 оборотов со скоростью 30±1 об/мин. Далее производят рассев пробы на ситах с размером ячеек 6,3 мм, 3,15 мм и 0,5

мм. Показатели восстановления-измельчения определяются по следующим формулам (6)–(8):

$$RDI_{+6,3} = \frac{m_1}{m_0} \cdot 100; \quad (6)$$

$$RDI_{-3,15} = \frac{m_0 - (m_1 + m_2)}{m_0} \cdot 100; \quad (7)$$

$$RDI_{-0,5} = \frac{m_0 - (m_1 + m_2 + m_3)}{m_0} \cdot 100, \quad (8)$$

где  $m_0$  – масса навески после восстановления, г;

$m_1$  – масса фракции больше 6,3 мм, г;

$m_2$  – масса фракции больше 3,15 мм, г;

$m_3$  – масса фракции больше 0,5 мм, г.

Результаты измерений также регистрируются с точностью до второго знака после запятой.

#### **4.2 Метод парной корреляции**

Для оценки влияния химического состава на горячую прочность железорудного сырья был применен метод парной корреляции.

Корреляционная связь – это согласованное изменение двух признаков, отражающее тот факт, что изменчивость одного признака находится в соответствии с изменчивостью другого.

По направлению корреляционная связь может быть положительной (прямой) и отрицательной (обратной). При положительной прямолинейной корреляции более высоким значениям одного признака соответствуют более высокие значения другого, а более низким значениям одного признака – низкие значения другого. При отрицательной корреляции соотношения обратные [30, 31].

В данной работе исследовалась зависимость между показателями горячей прочности и химическим составом сырья. Для оценки этой

зависимости используется коэффициент корреляции. Коэффициент корреляции измеряет тесноту взаимосвязи между фактором и откликом, представленными в количественных или порядковых шкалах. Для количественных шкал используется коэффициент корреляции Пирсона. Как отмечалось выше, корреляция может быть положительной и отрицательной. При положительной корреляции коэффициент корреляции имеет знак «+», а при отрицательной – знак «-». Величина коэффициента корреляции Пирсона не может превышать +1 и быть меньше, чем -1. Эти два числа +1 и -1 являются границами для коэффициента корреляции.

Коэффициент характеризует наличие только линейной связи между признаками, обозначаемыми, как правило, символами X и Y. Формула расчета коэффициента корреляции построена таким образом, что, если связь между признаками имеет линейный характер, коэффициент Пирсона точно устанавливает тесноту этой связи. Поэтому он называется также коэффициентом линейной корреляции Пирсона. Для качественной оценки тесноты связи между X и Y применяется шкала Чеддока, приведенная в таблице 8.

Таблица 8 – Шкала Чеддока [31, с. 51]

Абсолютное значение коэффициента корреляции	Теснота связи
0,1–0,3	Слабая
0,3–0,5	Умеренная
0,5–0,7	Заметная
0,7–0,9	Высокая
0,9–0,99	Весьма высокая

Из таблицы видно, что теснота связи делится на Слабую, умеренную, заметную, высокую и весьма высокую. Заметная теснота связи и выше являются значимыми в работе.

#### **4.3 Оценка влияния химического состава на горячую прочность железорудного сырья**

В работе для вычисления коэффициентов корреляции использовались встроенные функции Microsoft Excel. Коэффициенты корреляции для

показателей горячей прочности при динамическом и статическом методах представлены в таблицах 9 и 10.

Таблица 9 – Коэффициенты корреляции для показателей горячей прочности при динамическом методе (LTD)

	Окатыш КГОК			Агломерат КГОК			Железофлюс ВГОК		
	LTD +6,3, %	LTD -3,15, %	LTD -0,5, %	LTD +6,3, %	LTD -3,15, %	LTD -0,5, %	LTD +6,3, %	LTD -3,15, %	LTD -0,5, %
Fe	-0,55	0,05	0,14	-0,57	0,31	0,35	-0,25	0,29	0,39
FeO	-0,54	0,39	0,27	0,82	-0,81	-0,71	0,17	-0,20	-0,18
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,44	-0,40	-0,37	0,23	-0,19	-0,10	-0,18	0,18	0,17
MgO	0,19	-0,28	-0,27	0,72	-0,74	-0,70	0,04	-0,04	-0,15
TiO <sub>2</sub>	0,25	-0,12	-0,06	0,00	0,07	0,13	-0,28	0,33	0,45
MnO	0,31	-0,24	-0,23	0,56	-0,56	-0,59	0,02	-0,06	-0,08
CaO	-0,29	0,16	0,07	0,59	-0,25	-0,31	0,71	-0,52	-0,59
SiO <sub>2</sub>	0,02	-0,23	-0,30	-0,12	0,11	0,13	-0,03	0,07	0,07
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,03	0,04	0,06	-0,43	0,47	0,56	0,08	-0,06	-0,03

Таблица 10 – Коэффициенты корреляции для показателей горячей прочности при статическом методе (RDI)

	Окатыш КГОК			Агломерат КГОК			Железофлюс ВГОК		
	RDI +6,3, %	RDI -3,15, %	RDI -0,5, %	RDI +6,3, %	RDI -3,15, %	RDI -0,5, %	RDI +6,3, %	RDI -3,15, %	RDI -0,5, %
Fe	0,05	0,57	0,54	-0,26	0,64	0,68	-0,60	0,65	0,65
FeO	-0,02	0,05	0,02	0,82	-0,78	-0,42	0,01	-0,06	-0,17
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,25	-0,09	-0,08	0,31	-0,21	0,16	-0,34	0,32	0,22
MgO	0,24	-0,45	-0,48	0,67	-0,70	-0,67	0,16	-0,19	-0,27
TiO <sub>2</sub>	-0,10	0,26	0,27	-0,13	0,23	0,50	-0,40	0,47	0,57
MnO	-0,21	0,18	0,09	0,36	-0,34	-0,19	0,07	-0,11	-0,07
CaO	0,13	-0,21	-0,22	0,23	-0,64	-0,60	0,47	-0,73	-0,72
SiO <sub>2</sub>	0,14	-0,21	-0,24	0,06	-0,12	-0,24	0,08	0,00	0,13
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,51	-0,46	-0,39	-0,28	0,31	0,36	0,14	-0,06	0,05

По результатам расчета наиболее значимыми параметрами, влияющими на горячую прочность железорудного сырья, оказались: Fe, FeO, MgO, TiO<sub>2</sub>, MnO, CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. У этих параметров теснота связи с показателями горячей прочности более 0,5, то есть является заметной согласно шкале Чеддока (а в некоторых случаях высокой). Помимо этих соединений необходимо рассмотреть влияние V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, так как применяемое железорудное сырье изготавливается на основе титаномагнетитового концентрата.

Для анализа были построены зависимости между химическим соединением и показателями горячей прочности  $LTD_{+6,3}$  и  $RDI_{+6,3}$ . При этом общий массив данных был разделен на несколько интервалов (каждый интервал равен среднеквадратичному отклонению (СКО)  $LTD_{+6,3}$  и  $RDI_{+6,3}$ ). Для исключения выпадающих значений было вычислено среднее между всеми данными показателей  $LTD_{+6,3}$  и  $RDI_{+6,3}$ . После чего от найденного среднего значения взято  $\pm 3$ СКО. Значения, выпадающие из полученного интервала, были исключены.

Так как оба испытания направлены на определение горячей прочности при одинаковых условиях (температура нагрева, время испытания, состав восстановительного газа), то должна иметься прямая зависимость между показателем  $LTD_{+6,3}$  и показателем  $RDI_{+6,3}$ . На рисунке 3 представлены эти зависимости для агломерата и окатышей КГОК, а также для железофлюса.

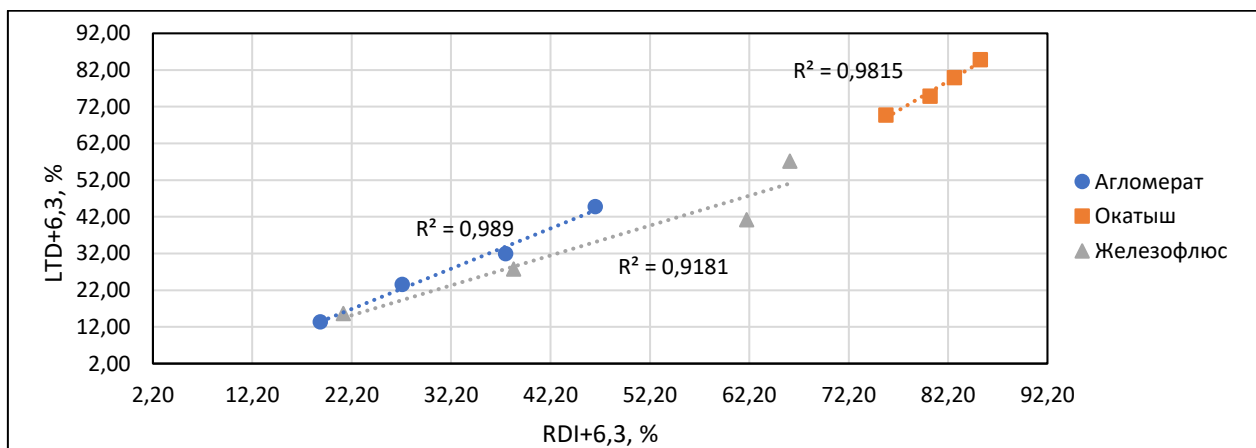


Рисунок 3 – Зависимость показателя  $LTD_{+6,3}$  от показателя  $RDI_{+6,3}$  в железорудном сырье

Для оценки достоверности результатов применяется величина достоверности аппроксимации  $R^2$ .  $R^2$  может быть от 0 до 1. Чем ближе величина к 1, тем более достоверной является полученная зависимость. Как видно из рисунка 3, зависимость между показателями  $LTD_{+6,3}$  и  $RDI_{+6,3}$  стремится к единице для всех материалов, поэтому можно утверждать, что, проводя анализ по показателю  $LTD_{+6,3}$  зависимость между химическим соединением и показателем  $RDI_{+6,3}$  будет такой же.

Значимой величиной достоверности аппроксимации было принято  $R^2 > 0,5$ . Соответственно, величина меньше 0,5 указывает на то, что зависимость не может являться достаточно достоверной.

Зависимость  $LTD_{+6,3}$  от содержания  $MgO$  в железорудном сырье представлена на рисунке 4.

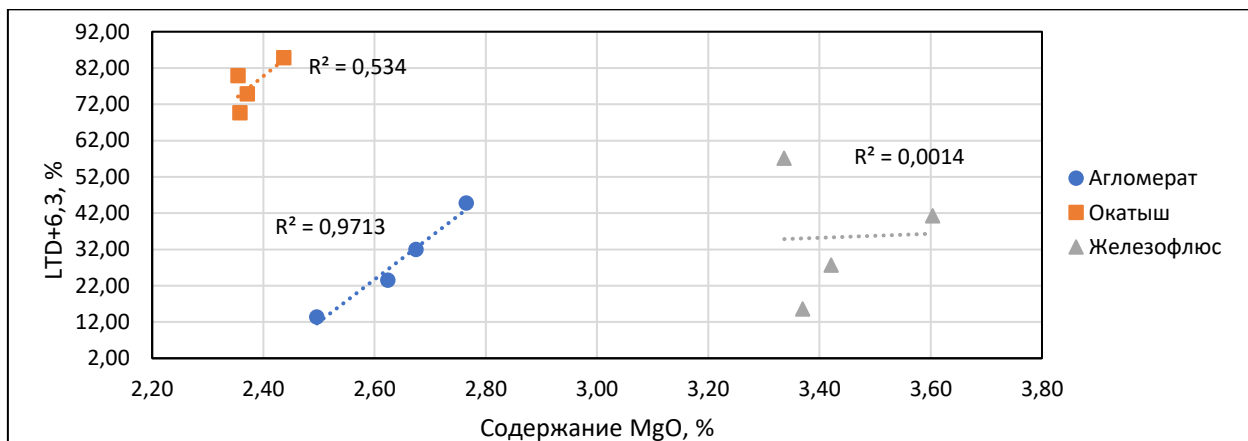
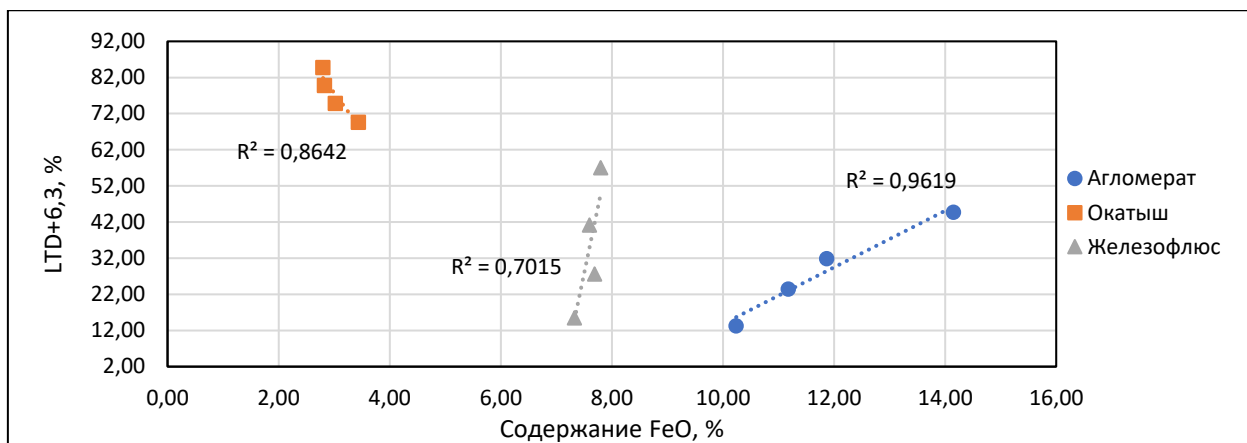


Рисунок 4 – Зависимость показателя  $LTD_{+6,3}$  от содержания  $MgO$  в железорудном сырье

На графике видно, что с увеличением содержания  $MgO$  в агломерате и окатышах КГОК возрастает горячая прочность. Это связано с тем, что повышение оксида магния в составе окатышей приводит к росту количества тугоплавкой рудной фазы – магнезиальной шпинели. При агломерации  $MgO$  образует магнезиовюстит, повышающий прочность готового продукта. Зависимости между горячей прочностью железофлюса ВГОК и содержанием  $MgO$  не выявлено ввиду узкого диапазона колебаний оксида магния в исследуемых пробах (от 3,34 до 3,42 %). Единственное значение 3,60%  $MgO$  не является точкой, показывающей реальную зависимость.

Зависимость  $LTD_{+6,3}$  от содержания  $FeO$  в железорудном сырье представлены на рисунке 5.



Рисинок 5 – Зависимость показателя LTD<sub>+6,3</sub> от содержания FeO в железорудном сырье

С повышением FeO горячая прочность агломерата КГОК и железофлюса ВГОК растет, так как известно, что закисные агломераты с пониженным содержанием Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (и соответственно с повышенным FeO) обладают более высокой горячей прочностью [8]. Однако, вопреки источнику [16] с ростом содержания монооксида железа в окатышах КГОК наблюдается снижение прочности при восстановлении.

Зависимость LTD<sub>+6,3</sub> от содержания Fe в железорудном сырье представлена на рисунке 6.

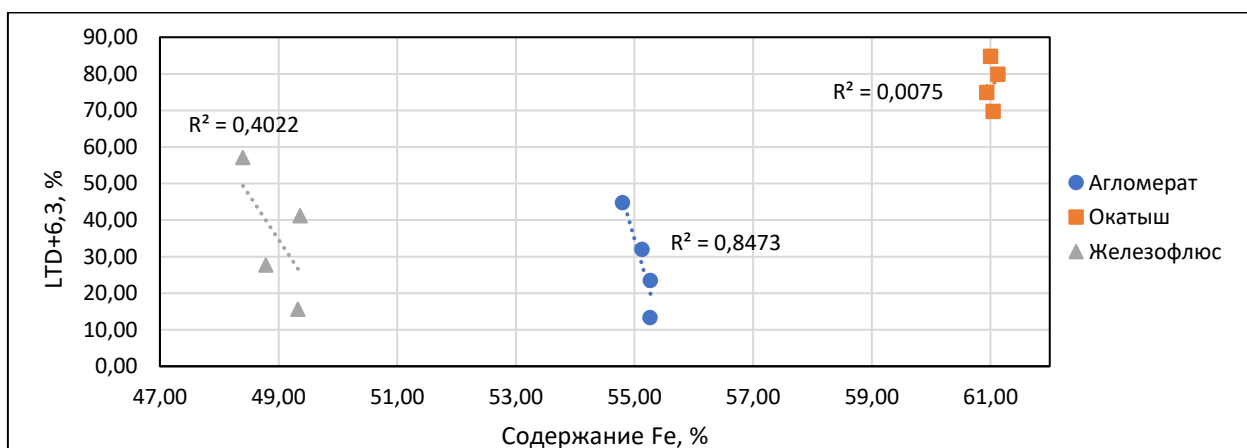


Рисунок 6 – Зависимость показателя LTD<sub>+6,3</sub> от содержания Fe в железорудном сырье

В результате наблюдается снижение горячей прочности агломерата КГОК и железофлюса ВГОК с повышением содержания Fe в них. Однако такая тенденция не соотносится с источником [20], утверждающим, что с ростом Fe в концентрате повышается горячая прочность агломерата.

Зависимости между горячей прочностью и содержанием Fe в окатышах не найдено ввиду узкого диапазона по содержанию Fe (от 60,94 до 61,13 %).

Зависимость  $LTD_{+6,3}$  от содержания CaO в железорудном сырье представлена на рисунке 7.

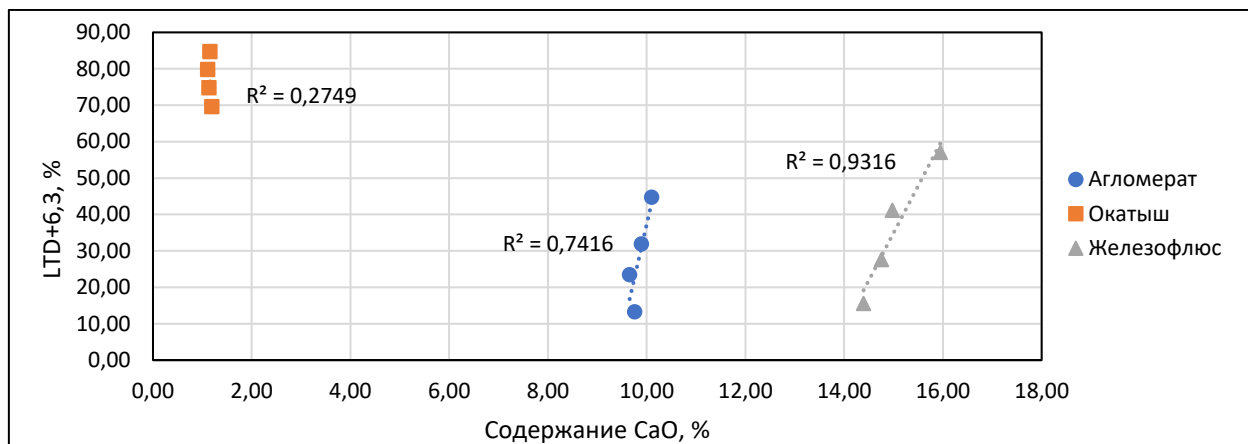


Рисунок 7 – Зависимость показателя  $LTD_{+6,3}$  от содержания CaO в железорудном сырье

С повышением содержания CaO (соответственно с ростом основности) в агломерате КГОК и железофлюсе ВГОК наблюдается повышение горячей прочности. Такие же зависимости наблюдаются в исследованиях [20]. В окатышах КГОК не выявлено закономерностей по влиянию CaO на горячую прочность, так как окатыши неофлюсованные и содержание CaO изменяется в небольшом диапазоне.

Зависимость  $LTD_{+6,3}$  от содержания  $Al_2O_3$  в железорудном сырье представлена на рисунке 8.

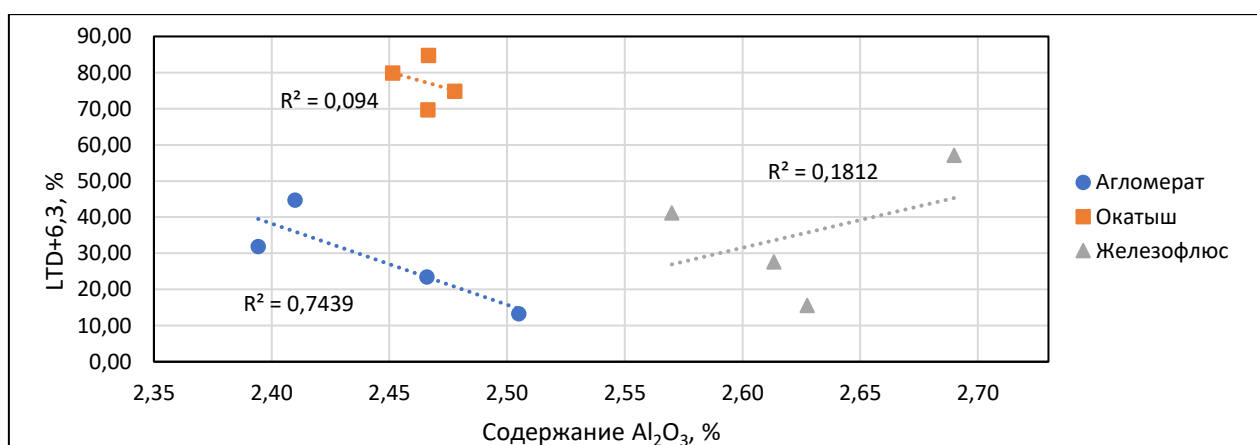


Рисунок 8 – Зависимость показателя  $LTD_{+6,3}$  от содержания  $Al_2O_3$  в железорудном сырье

С ростом содержания  $Al_2O_3$  в агломерате КГОК наблюдается снижение горячей прочности. Однако изменения содержания оксида алюминия настолько невелики, что данная зависимость может являться незначимой. По другим материалам зависимости не выявлено. В литературных источниках также не найдены подтверждения влияния  $Al_2O_3$  на горячую прочность железорудного сырья.

Зависимость  $LTD_{+6,3}$  от содержания  $TiO_2$  в железорудном сырье представлена на рисунке 9.

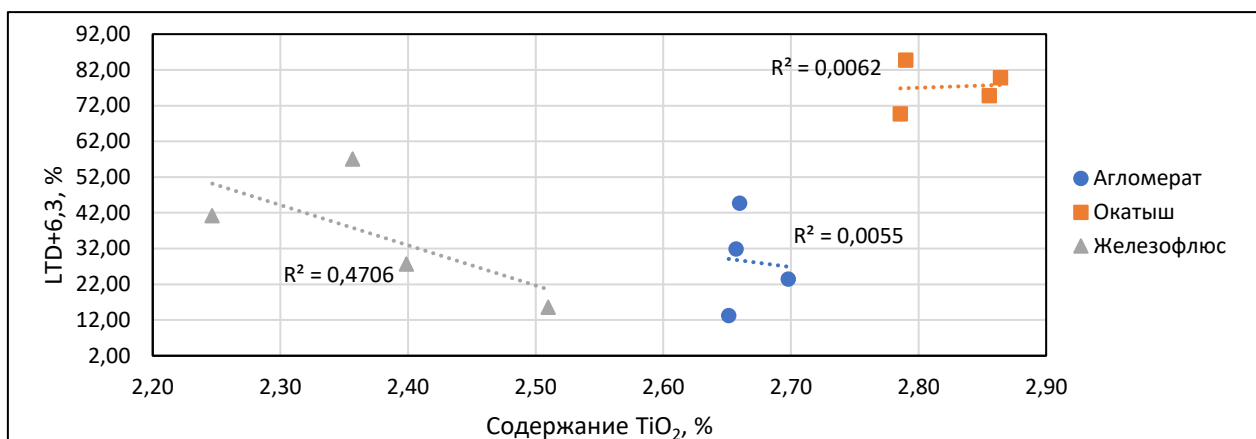


Рисунок 9 – Зависимость показателя  $LTD_{+6,3}$  от содержания  $TiO_2$  в железорудном сырье

На графике не наблюдается ярко выраженных зависимостей между содержанием  $TiO_2$  в железорудном сырье и горячей прочностью. В литературных данных также нет подтверждения о влиянии диоксида титана на горячую прочность.

Зависимость  $LTD_{+6,3}$  от содержания  $MnO$  в железорудном сырье представлена на рисунке 10.

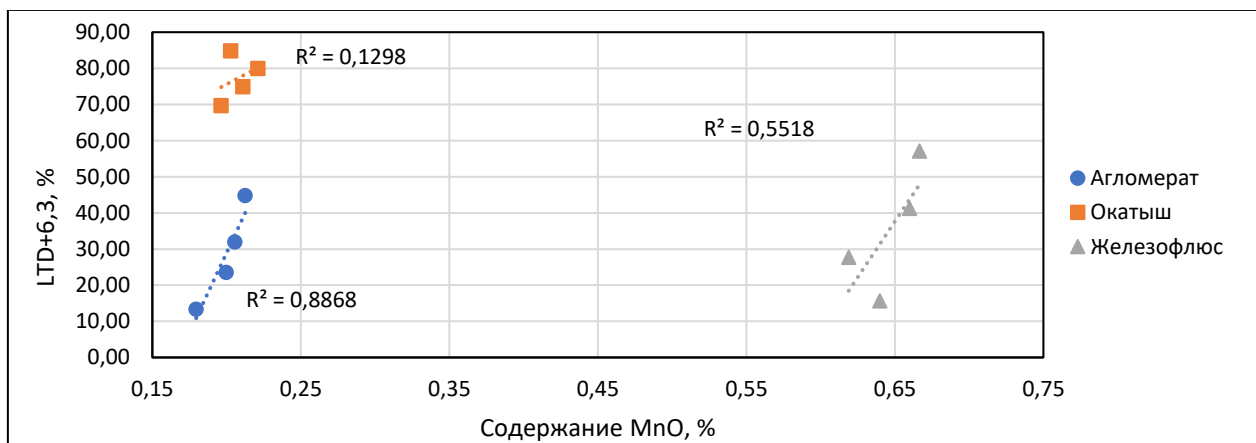


Рисунок 10. Зависимость показателя  $LTD_{+6,3}$  от содержания  $MnO$  в железорудном сырье

При повышении содержания  $MnO$  в агломерате КГОК и железофлюсе ВГОК наблюдается повышение прочности при восстановлении. Согласно [32] марганец повышает высокотемпературные свойства агломератов. Однако влияние марганца на окатыши КГОК установить не удалось, так как колебания по содержанию  $MnO$  в них невелики.

Зависимость  $LTD_{+6,3}$  от содержания  $V_2O_5$  в железорудном сырье представлена на рисунке 11.

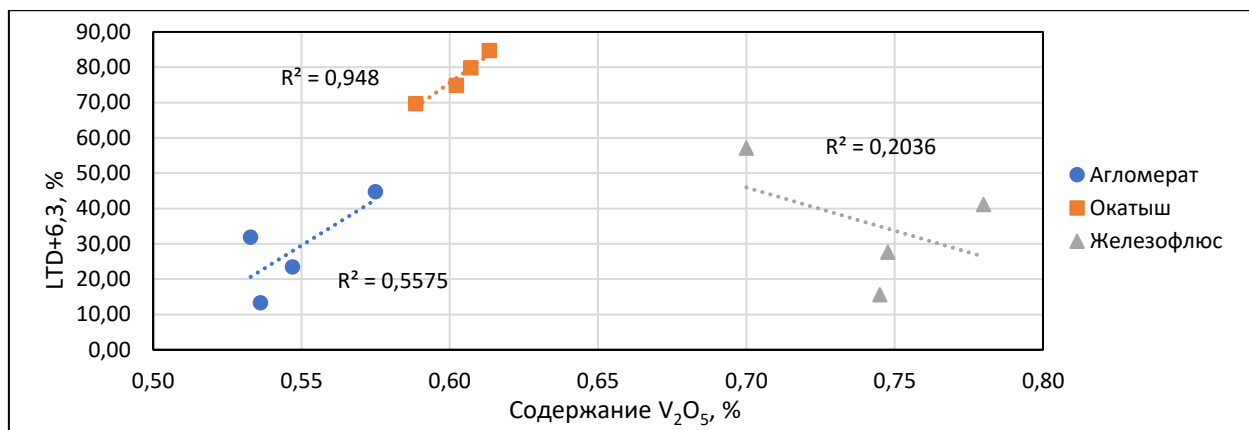


Рисунок 11 – Зависимость показателя  $LTD_{+6,3}$  от содержания  $V_2O_5$  в железорудном сырье

По графику видно, что с повышением содержания  $V_2O_5$  увеличивается прочность при восстановлении агломерата и окатышей КГОК. И в том и в другом материале изменение содержания пентоксида ванадия крайне небольшие, поэтому зависимости можно считать незначимыми. Влияние  $V_2O_5$  на прочность железофлюса ВГОК не обнаружено. В литературных данных также нет данных по влиянию пентоксида ванадия на прочность при восстановлении железорудного сырья.

#### 4.4 Выводы по разделу 4

На основании построенных графиков, приведенных на рисунках 4-11 можно сделать следующие выводы:

- с увеличением содержания  $MgO$  в агломерате КГОК возрастает горячая прочность, так как  $MgO$  образует магнезиовюстит, повышающий прочность готового продукта. С повышением  $FeO$  горячая прочность агломерата КГОК также растет, в связи с тем, что закисные агломераты

обладают более высокой горячей прочностью, чем окисные (с пониженным содержанием FeO). По выведенным зависимостям повышенное содержание Fe ухудшает прочность агломерата при восстановлении, однако по литературным данным зависимость обратная. С повышением содержания CaO в агломерате наблюдается повышение горячей прочности. При повышении содержания MnO в агломерате повышается прочность при восстановлении, так как марганец повышает высокотемпературные свойства агломератов. Установить достоверное влияние  $Al_2O_3$  и  $V_2O_5$  на прочность агломерата не удалось ввиду узкого диапазона изменения содержания этих элементов. Влияние  $TiO_2$  на прочность при восстановлении также не установлено,

– с увеличением содержания MgO в окатышах КГОК возрастает горячая прочность, так как оксид магния в составе окатышей образует тугоплавкую рудную фазу – магнезиальную шпинель. С ростом содержания монооксида железа в окатышах КГОК наблюдается снижение прочности при восстановлении, что противоречит литературным данным. Установить достоверное влияние Fe, CaO, MnO и  $V_2O_5$  на прочность окатышей не удалось ввиду узкого диапазона изменения содержания этих элементов. Влияние  $Al_2O_3$  и  $TiO_2$  на прочность при восстановлении также не установлено,

– влияние MgO в железоблюсе ВГОК на прочность при восстановлении не выявлено ввиду узкого диапазона колебаний оксида магния в исследуемых пробах. С повышением FeO горячая прочность железоблюса растет. Как и в случае с агломератом КГОК закисный железоблюс обладает более высокой горячей прочностью, чем окисный. По выведенным зависимостям повышенное содержание Fe ухудшает прочность железоблюса при восстановлении, однако эта зависимость идет вразрез с другими источниками. С повышением содержания CaO в железоблюсе наблюдается повышение горячей прочности. При повышении содержания MnO в железоблюсе наблюдается увеличение прочности при восстановлении, так как марганец повышает высокотемпературные свойства. Установить достоверное влияние  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$  и  $V_2O_5$  на прочность железоблюса не удалось.

## **5 ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВОССТАНОВИМОСТИ ЖЕЛЕЗОРУДНОГО СЫРЬЯ В ЦЕНТРЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СЫРЬЯ АО «ЕВРАЗ НТМК»**

В Лаборатории металлургических испытаний Центральной лаборатории комбината проводились исследования по определению показателей восстановимости агломерата и железорудных окатышей производства Качканарского ГОКа, а также железоблюха производства Высокогорского ГОКа.

Для оценки восстановимости железорудного сырья были взяты следующие показатели:

- конечная степень показателя восстановления  $R_{180}$  после 180 минут воздействия восстановительного газа,
- индекс восстановимости железорудного сырья до 65%  $R_{t65}$ ,
- индекс восстановимости до 80%  $R_{t80}$  при восстановлении железорудного сырья под нагрузкой.

### **5.1 Метод определения конечной степени восстановления $R_{180}$**

Для определения конечной степени показателя восстановления  $R_{180}$  применяется стандарт ISO 7215 [33]. Навеску железорудного сырья массой 500 г изотермически восстанавливают в неподвижном слое при температуре 900 °С в течении 180 минут используя газ восстановитель, содержащий 70%  $N_2$  и 30% CO. Для испытания используется такая же восстановительная трубка, как и при определении показателей низкотемпературного восстановления-измельчения при статическом методе восстановления. Схема испытательной установки представлена на рисунке 8. Диапазон размеров окатышей, агломерата и железоблюха должен составлять от 10 до 12,5 мм.

Перед испытанием настраивают весы, регистрирующие потерю массы при восстановлении. Во время нагрева пробы через трубку пропускают азот ( $N_2$ ) со скоростью 5 л/мин. Когда проба нагреется до рабочей температуры скорость подачи азота увеличивают до 15 л/мин на период установления

температурного равновесия. После этого вводят восстановительный газ со скоростью потока 15 л/мин, чтобы заменить N<sub>2</sub>. Через 180 минут восстановления регистрируют данные по потере массы навески ( $\Delta m$ ), прекращают подачу газа восстановителя, после чего вводят N<sub>2</sub> со скоростью 5 л/мин в течении 5 минут или дольше, чтобы выдуть газ восстановитель из трубки.

Конечная степень восстановления R<sub>180</sub> выраженная как процентная концентрация по массе, рассчитывается по следующей формуле (9):

$$R_{180} = \left| \frac{\Delta m}{m_0(0,430w_2 - 0,111w_1)} \cdot 100 \right| \cdot 100, \quad (9)$$

где R<sub>180</sub> – конечная степень восстановления через 180 минут, %;

m<sub>0</sub> – масса навески, г;

$\Delta m$  – потеря массы навески после 180 мин. восстановления, г;

w<sub>1</sub> – массовая доля окиси железа (II) перед испытанием, рассчитанная по массовой доле железа (II) путем умножением на коэффициент трансформации окисла FeO/Fe(II) = 1,286, %;

w<sub>2</sub> – общее содержание железа, как процентная концентрация по массе в навеске до испытания, %.

Результаты измерений регистрируются с точностью до второго знака после запятой.

## 5.2 Метод определения индекса восстановимости до 65% Rt<sub>65</sub>

Для определения индекса восстановимости до 65% Rt<sub>65</sub> применяется стандарт ISO 4695 [34]. Навеску железорудного сырья массой 500 г изотермически восстанавливают в неподвижном слое при температуре 950 °С до тех пор, пока степень восстановления пробы не достигнет 65%. Газ восстановитель содержит 60% N<sub>2</sub> и 40% CO. Для испытания используется такая же восстановительная трубка, как и при определении показателей низкотемпературного восстановления-измельчения при статическом методе

восстановления. Схема испытательной установки представлена на рисунке 8. Диапазон размеров окатышей, агломерата и железоблюса должен составлять от 10 до 12,5 мм.

Перед испытанием настраивают весы, регистрирующие потерю массы при восстановлении. Во время нагрева пробы через трубку пропускают азот ( $N_2$ ) со скоростью 25 л/мин. Когда проба нагреется до рабочей температуры скорость подачи азота увеличивают до 50 л/мин на период установления температурного равновесия. После этого вводят восстановительный газ со скоростью потока 50 л/мин, чтобы заменить  $N_2$ . Потерю массы навески ( $\Delta m_t$ ) регистрируют непрерывно на протяжении всего испытания. Когда степень восстановления достигает 65% прекращают подачу газа восстановителя, после чего вводят  $N_2$  со скоростью 5 л/мин в течении 5 минут или дольше, чтобы выдуть газ восстановитель из трубки.

Показатель восстановимости, выраженный как степень восстановления при атомном отношении O/Fe, равном 0,9 %/мин, рассчитывается по следующей формуле (10):

$$Rt_{65} = \left( \frac{0,111w_1}{0,430w_2} + \frac{\Delta m_t}{m_0 0,430w_2} \cdot 100 \right) \cdot 100, \quad (10)$$

где  $Rt_{65}$  – индекс восстановимости до 65%, %/мин;

$m_0$  – масса навески, г;

$\Delta m_t$  – потеря массы, навески после времени восстановления, г;

$w_1$  – массовая доля окиси железа (II) перед испытанием, рассчитанная по массовой доле железа (II) путем умножением на коэффициент трансформации окисла  $FeO/Fe(II) = 1,286, \%$ ;

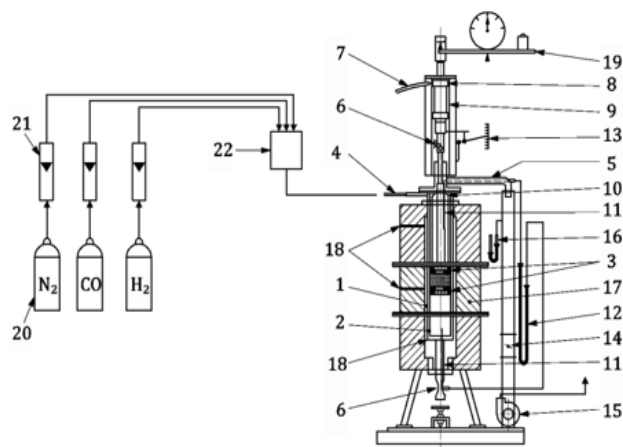
$w_2$  – общее содержание железа, как процентная концентрация по массе в навеске до испытания, %.

Результаты измерений регистрируются с точностью до второго знака после запятой.

### **5.3 Метод определения индекса восстановимости до 80% $R_{t80}$ при восстановлении под нагрузкой**

Для определения индекса восстановимости до 80%  $R_{t80}$  при восстановлении под нагрузкой применяется стандарт ISO 7992 [35]. Данный метод имитирует условия, сходные с условиями, преобладающими в зоне восстановления доменной печи. Навеску железорудного сырья массой 1200 г изотермически восстанавливают при температуре 1050 °С до тех пор, пока степень восстановления пробы не достигнет 80%. Газ восстановитель содержит 58%  $N_2$ , 40%  $CO$  и 2%  $H_2$ . Для испытания используется восстановительная трубка с двойной стенкой из не образующего окалину жароустойчивого металла, способная выдерживать температуру выше 1050 °С и устойчивая к деформации. Внутренний диаметр внутренней восстановительной трубки должен быть 125 мм  $\pm$  1 мм. В восстановительной трубке должна быть установлена съемная перфорированная пластина с целью удержания навески и обеспечения равномерного потока газа через нее. Для задания постоянной нагрузки требуется нагружающее устройство, способное обеспечить общую статическую нагрузку 50 кПа  $\pm$  2 кПа равномерно ко всей навеске. Нагрузка должна передаваться с помощью плунжера.

Схема испытательной установки представлена на рисунке 12. Диапазон размеров окатышей, агломерата и железофлюса должен составлять от 10 до 12,5 мм.



1 – внешняя восстановительная трубка; 2 – внутренняя восстановительная трубка; 3 – верхняя и нижняя перфорированные пластины с испытуемой навеской; 4 – вход газа; 5 – выход газа; 6 – термопара для измерения температуры восстановления; 7 – впускное отверстие для сжатого воздуха; 8 – пресс-цилиндр; 9 – рама пресс-цилиндра; 10 – нагрузочный плунжер; 11 – верхние и нижние датчики перепада давления газа; 12 – манометр перепада давления газа; 13 – линейная шкала; 14 – дросселирующий клапан; 15 – вентилятор для отработанного газа; 16 – измеритель тяги; 17 – электрическая печь; 18 – термопары стенок печи; 19 – весы; 20 – газовые цилиндры; 21 – приборы учета потока газа; 22 – смесительная камера.

Рисунок 12 – Установка для нагрева и восстановления пробы при статическом методе [34, с. 16]

Перед испытанием настраивают весы, регистрирующие потерю массы при восстановлении. Во время нагрева пробы через трубку пропускают азот ( $N_2$ ) со скоростью 50 л/мин. Когда проба нагреется до рабочей температуры скорость подачи азота увеличивают до 83 л/мин на период установления температурного равновесия. После этого вводят восстановительный газ со скоростью потока 83 л/мин, чтобы заменить  $N_2$ . Потерю массы навески ( $\Delta m_t$ ) регистрируют непрерывно на протяжении всего испытания. Когда степень восстановления достигает 80% прекращают подачу газа восстановителя, после чего вводят  $N_2$  со скоростью 5 л/мин в течении 5 минут или дольше, чтобы выдуть газ восстановитель из трубки.

Показатель восстановимости, выраженный как степень восстановления при атомном отношении O/Fe, равном 0,9 %/мин, рассчитывается по следующей формуле (11):

$$Rt_{80} = \left( \frac{0,111w_1}{0,430w_2} + \frac{\Delta m_t}{m_0 0,430w_2} \cdot 100 \right) \cdot 100, \quad (11)$$

где  $R_{t80}$  – индекс восстановимости до 80%, %/мин;

$m_0$  – масса навески, г;

$\Delta m_t$  – потеря массы, навески после времени восстановления,  $t$ , в граммах;

$w_1$  – массовая доля окиси железа (II) перед испытанием, рассчитанная по массовой доле железа (II) путем умножением на коэффициент трансформации окисла  $FeO/Fe(II) = 1,286, \%$ ;

$w_2$  – общее содержание железа, как процентная концентрация по массе в навеске до испытания, %.

Результаты измерений регистрируются с точностью до второго знака после запятой.

#### 5.4 Оценка влияния химического состава на восстановимость железорудного сырья

Коэффициенты корреляции для показателей восстановимости представлены в таблице 11.

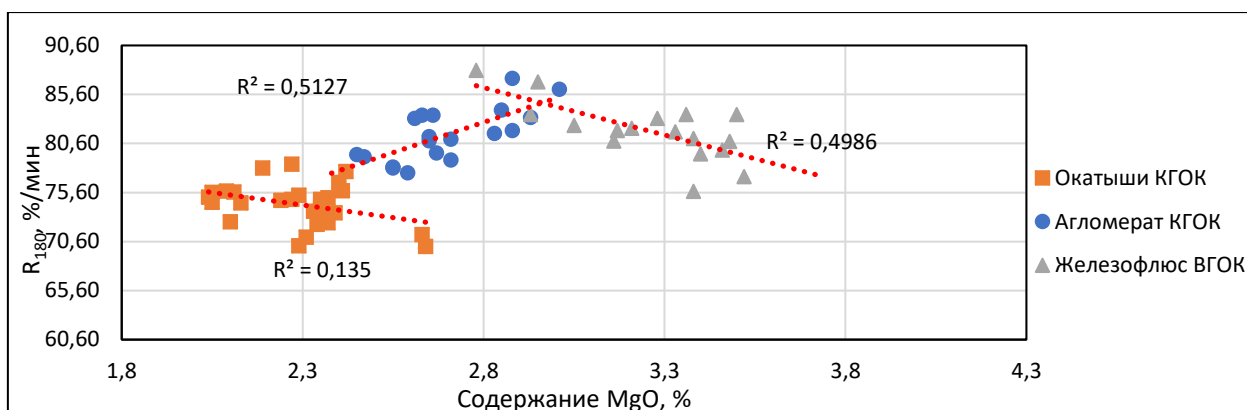
Таблица 11 – Коэффициенты корреляции для показателей восстановимости

	Окатыш КГОК			Агломерат КГОК			Железофлюс ВГОК		
	$R_{180}, \%$	$R_{t65}, \%/мин$	$R_{t80}, \%/мин$	$R_{180}, \%$	$R_{t65}, \%/мин$	$R_{t80}, \%/мин$	$R_{180}, \%$	$R_{t65}, \%/мин$	$R_{t80}, \%/мин$
Fe	-0,04	-0,12	0,13	-0,36	-0,31	-0,28	0,08	0,17	-0,15
FeO	0,28	0,24	0,31	-0,04	0,14	0,03	-0,01	-0,05	0,02
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-0,12	-0,18	-0,30	0,23	0,35	0,10	-0,55	-0,59	-0,41
MgO	0,16	0,32	0,12	0,50	0,31	0,27	-0,57	-0,73	-0,51
TiO <sub>2</sub>	0,07	0,19	0,10	-0,03	-0,08	-0,04	-0,12	-0,07	-0,11
MnO	0,23	0,50	0,56	0,10	0,13	0,32	0,16	-0,05	0,23
CaO	-0,05	-0,33	-0,32	0,08	0,18	0,19	-0,16	-0,17	0,04
SiO <sub>2</sub>	-0,21	0,01	-0,06	0,06	-0,25	-0,23	-0,20	-0,20	0,03
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0,06	-0,11	-0,08	0,12	-0,21	-0,03	0,35	0,18	0,44

По результатам расчета наиболее значимыми параметрами, влияющими на восстановимость железорудного сырья, оказались: V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, MgO, MnO. У этих параметров теснота связи с показателями горячей прочности более 0,5, то есть является заметной согласно шкале Чеддока (а в некоторых случаях высокой).

Были построены зависимости между химическим соединением и показателями восстановимости  $R_{180}$ ,  $R_{t65}$  и  $R_{t80}$  после очистки массива

данных. Зависимости  $R_{180}$ ,  $R_{t_{65}}$  и  $R_{t_{80}}$  от содержания  $MgO$  в железорудном сырье представлены на рисунках 13-15.



Рисинок 13 – Зависимость показателя  $R_{180}$  от содержания  $MgO$  в железорудном сырье

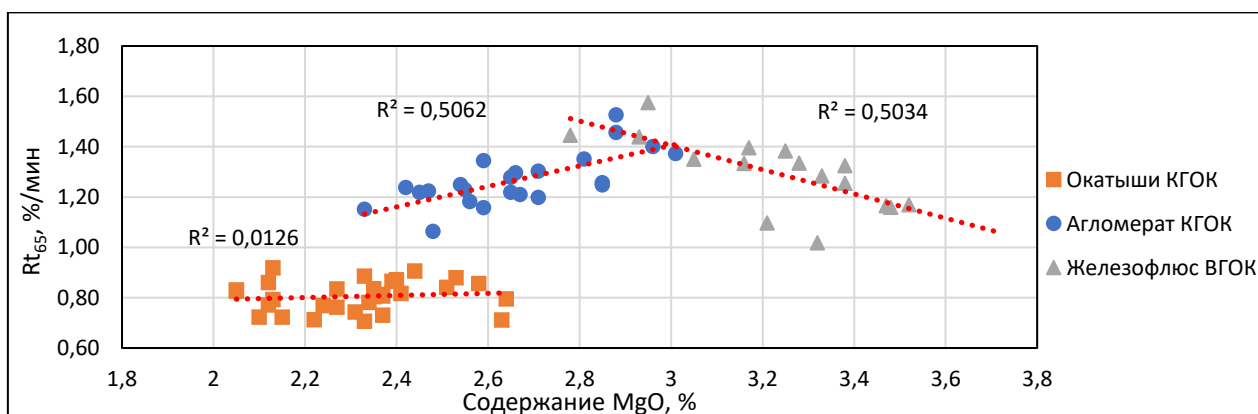


Рисунок 14 – Зависимость показателя  $R_{t_{65}}$  от содержания  $MgO$  в железорудном сырье

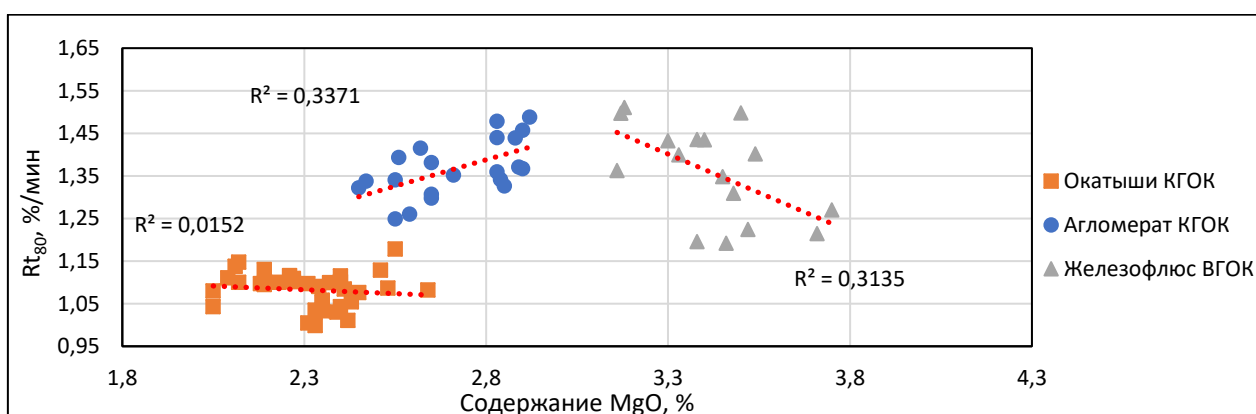


Рисунок 15 – Зависимость показателя  $R_{t_{80}}$  от содержания  $MgO$  в железорудном сырье

С повышением содержания  $MgO$  растет восстановимость по всем показателям только у агломерата КГОК. У железофлюса ВГОК, напротив, наблюдается снижение восстановимости. Это можно объяснить тем, что при

спекании шихты железоблюса в процессе агломерации не происходит тех фазовых превращений с MgO, которые происходят при спекании концентрата КГОК в процессе производства агломерата. Влияние MgO на восстановимость окатышей КГОК не установлено. По литературным данным оксид магния должен оказывать затормаживающее влияние на формирование фазового состава, что приводит к снижению восстановимости при повышении MgO. Это связано с тем, что MgO в составе шихты окатышей ограничивает процесс ферритообразования и, как следствие, силикатообразования, что приводит к появлению в их составе магнезиальной шпинели, которая является высокотемпературной рудной фазой.

Зависимости  $R_{180}$ ,  $R_{t65}$  и  $R_{t80}$  от содержания  $V_2O_5$  в железорудном сырье представлены на рисунках 16-18.

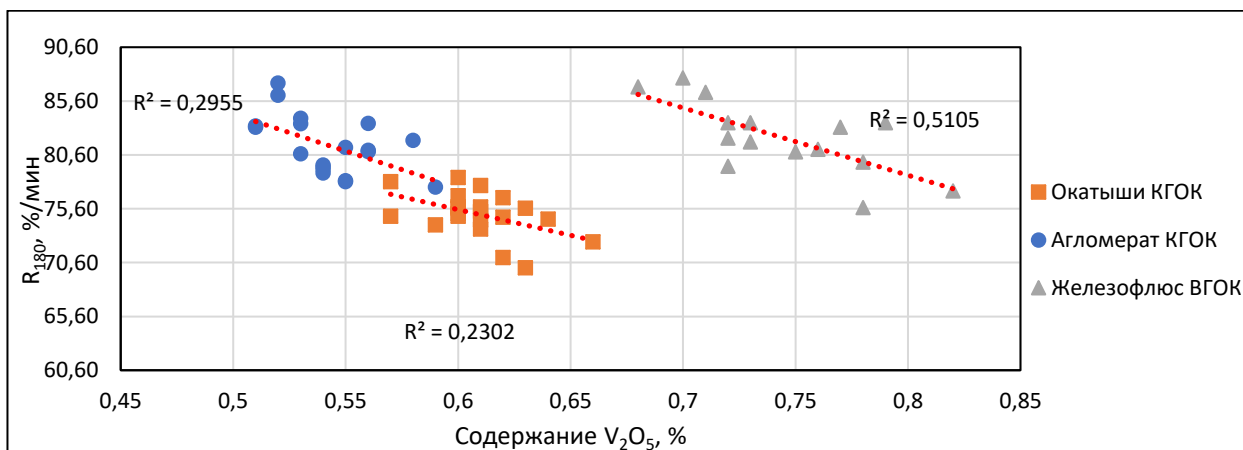


Рисунок 16 – Зависимость показателя  $R_{180}$  от содержания  $V_2O_5$  в железорудном сырье

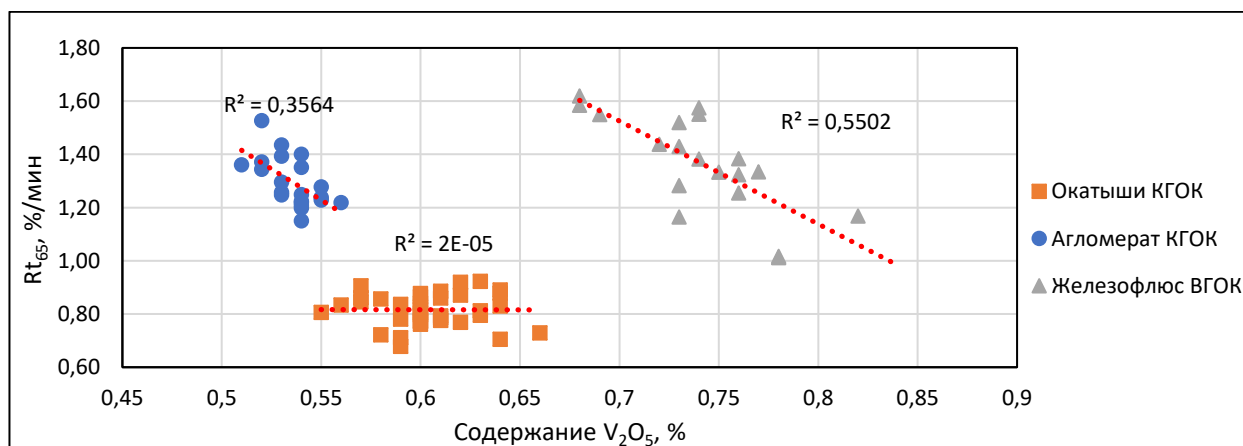


Рисунок 17 – Зависимость показателя  $R_{t65}$  от содержания  $V_2O_5$  в железорудном сырье

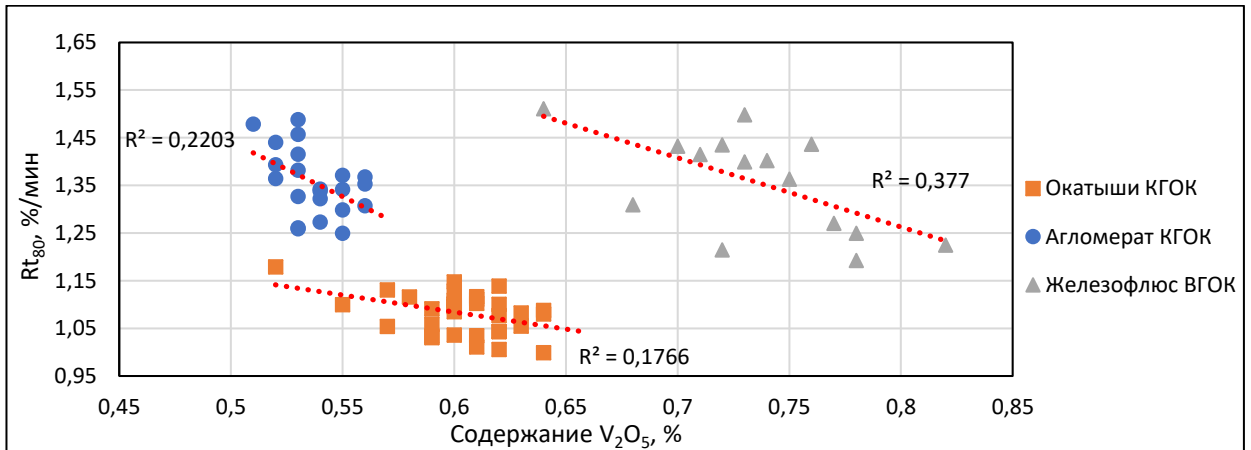


Рисунок 18 – Зависимость показателя  $R_{t80}$  от содержания  $V_2O_5$  в железорудном сырье

Во всех исследованных материалах повышение содержания  $V_2O_5$  снижает восстановимость железорудного сырья. Это связано с тем, что восстановление пентаоксида ванадия до  $V_2O_3$  протекает труднее, чем восстановление железа, соответственно повышенное содержание  $V_2O_5$  приводит к ухудшению восстановимости сырья.

Зависимости  $R_{180}$ ,  $R_{t65}$  и  $R_{t80}$  от содержания  $MnO$  в железорудном сырье представлены на рисунках 19-21.

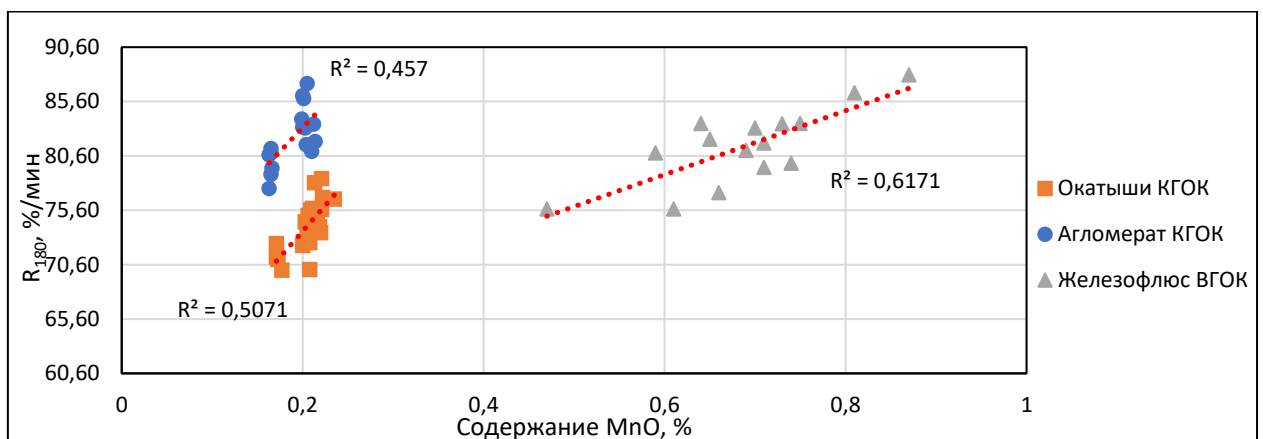


Рисунок 19 – Зависимость показателя  $R_{180}$  от содержания  $MnO$  в железорудном сырье

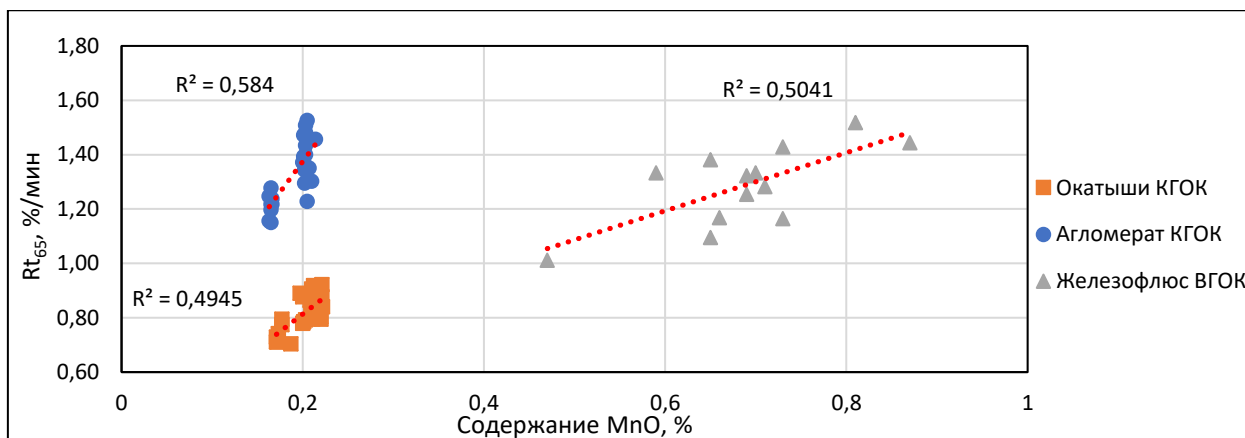


Рисунок 20 – Зависимость показателя  $Rt_{65}$  от содержания  $MnO$  в железорудном сырье

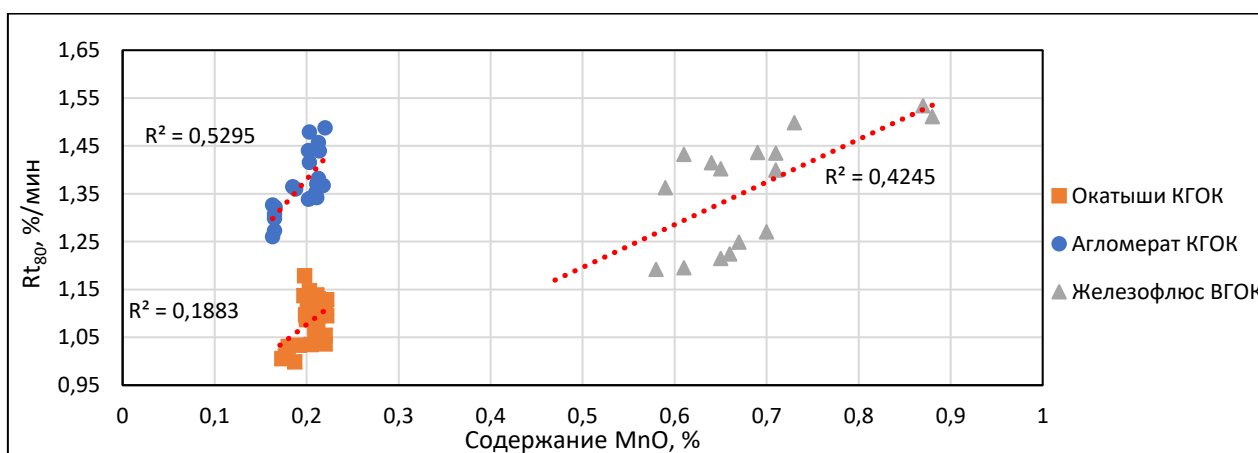


Рисунок 21 – Зависимость показателя  $Rt_{80}$  от содержания  $MnO$  в железорудном сырье

$MnO$  во всех исследованных материалах положительно влияет на восстановимость, так как восстановление высших оксидов марганца протекает легче и быстрее, чем восстановление оксидов железа до  $FeO$ , поэтому повышенное содержание марганца в железорудном сырье приведет к повышению его восстановимости.

### 5.5 Выводы по разделу 5

На основании построенных графиков, приведенных на рисунках 13-21 можно сделать следующие выводы:

– с повышением содержания  $MgO$  растет восстановимость агломерата КГОК.  $V_2O_5$  снижает восстановимость агломерата КГОК, так как восстановление пентаоксида ванадия до  $V_2O_3$  протекает труднее, чем восстановление железа. Входящий в состав агломерата КГОК  $MnO$

положительно влияет на восстановимость, так как косвенное восстановление высших оксидов марганца протекает легче и быстрее, чем восстановление оксидов железа до FeO,

– достоверного влияния MgO на восстановимость окатышей КГОК установить не удалось. V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> снижает восстановимость окатышей КГОК, так как V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> косвенным путем восстанавливается труднее, чем оксид железа. MnO положительно влияет на восстановимость окатышей КГОК, так как восстановление оксидов марганца газом протекает легче, чем восстановление оксидов железа,

– с повышением содержания MgO восстановимость железофлюса ВГОК снижается, так как при спекании шихты железофлюса в процессе агломерации не происходит тех фазовых превращений, которые происходят при спекании концентрата КГОК. Пятиокись ванадия, как в случае с агломератом и окатышем КГОК, снижает восстановимость железофлюса ВГОК. Влияние MnO на железофлюс ВГОК аналогично влиянию его на агломерат и окатыши КГОК.

## 6 РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНОГО ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ЖЕЛЕЗОРУДНОГО СЫРЬЯ

Для определения наилучших показателей восстановимости и горячей прочности железорудных материалов требуется построить модель, позволяющую рассчитывать эти показатели исходя из заданного химического состава материалов. В предыдущих разделах были определены элементы, оказывающие наибольшее влияние на восстановимость и горячую прочность. Именно по этим элементам будут строиться модели для каждого из железорудных материалов. Для модели по расчету восстановимости был принят показатель  $Rt_{65}$ .

### 6.1 Построение модели с помощью алгоритма Random Forest

Алгоритм машинного обучения Random Forest – универсальный алгоритм машинного обучения, суть которого состоит в использовании ансамбля решающих деревьев. Само по себе решающее дерево предоставляет крайне невысокое качество классификаций, но из-за большого их количества результат значительно улучшается. Также это один из немногих алгоритмов, который можно использовать в абсолютном большинстве задач.

Все деревья строятся по следующей схеме:

- выбирается подвыборка обучающей выборки размера  $sample\ size$  (может быть с возвращением) – по ней строится дерево (для каждого дерева – своя подвыборка),
- для построения каждого расщепления в дереве просматривается  $max\_features$  случайных признаков (для каждого нового расщепления – свои случайные признаки),
- выбирается наилучший признак и расщепление по нему (по заранее заданному критерию). Дерево строится, как правило, до исчерпания выборки (пока в листьях не останутся представители только одного класса), однако есть параметры, которые ограничивают высоту дерева, число объектов в листьях и число объектов в подвыборке, при котором проводится расщепление.

Такая схема построения соответствует главному принципу ансамблирования (построению алгоритма машинного обучения на базе нескольких решающих деревьев): базовые алгоритмы должны быть хорошими и разнообразными (поэтому каждое дерево строится на своей собственной обучающей выборке и при выборе расщеплений есть элемент случайности).

Для построения модели с помощью алгоритма Random Forest использовался менеджер пакетов Anaconda. В менеджере выбран пакет Spyder. Язык программирования в данном пакете – Python. Основная библиотека для этого алгоритма – Scikit-learn.

В данном алгоритме выборка делится на 2 части: тренировочный набор данных (принят 80% от объема выборки) и тестовый набор данных (принят 20% от объема выборки). По тренировочному набору модель учится, а на тестовом проходит проверку работоспособности. На рисунке 22 приведен код, делящий выборку на тренировочный и тестовый набор данных.

```
#разделим набор на тренировочный и тестовый
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, Y1, test_size=0.2, random_state=42)

print('Y', y_train)
print('Y_Test', y_test)
print('X', X_train)
print('X_Test', X_test)
```

Рисунок 22 – Деление выборки на тренировочные и тестовые данные

Число деревьев задается командой `n_estimators`. Чем больше деревьев, тем лучше качество, но время настройки и работы Random Forest также пропорционально увеличиваются. При увеличении `n_estimators` качество на обучающей выборке повышается (может даже доходить до 100%), а качество на тесте выходит на асимптоту. Оптимальное число деревьев оказалось 55. На рисунке 23 заданное количество деревьев.

```
model = RandomForestClassifier(n_estimators=55)
model.fit(X_train, y_train)
#criterion gini and entropy
```

Рисунок 23 – Принятое число деревьев

Следующий параметр, который требуется задать – число признаков для выбора расщепления – `max_features`. При увеличении `max_features`

увеличивается время построения леса, а деревья становятся «более однообразными». По умолчанию параметр равен  $\sqrt{n}$ . В данном случае, так как деревьев не очень много, число признаков задается по умолчанию функцией «auto». Минимальное число объектов, при которых осуществляется расщепление – `min_samples_split`. Этот параметр не очень важный и принимается по умолчанию равным 10, так как при увеличении параметра качество на обучении падает, а время построения Random Forest сокращается. Ограничение на число объектов в листьях – `min_samples_leaf`. Этот параметр был принят по умолчанию равным 5. В данном случае максимальная глубина деревьев `max_depth` не задается, так как выборка небольшая. Критерий расщепления `criterion` выбран Gini. На рисунке 24 приведен код, описывающий все критерии. По умолчанию в библиотеке sklearn параметр `n_jobs = 1`, то есть случайный лес строится на одном процессоре. Для построения воспроизводимых экспериментов используется предустановка генератора псевдослучайных чисел `random_state`, которая также задается по умолчанию и равна 42.

```
RandomForestClassifier(bootstrap=True, ccp_alpha=0.0, class_weight=None,
                        criterion='gini', max_depth=None, max_features='auto',
                        max_leaf_nodes=None, max_samples=None,
                        min_impurity_decrease=0.0,
                        min_samples_leaf=5, min_samples_split=10,
                        min_weight_fraction_leaf=0.0, n_estimators=55,
                        n_jobs=1, oob_score=False, random_state=42,
                        verbose=1, warm_start=False)
```

Рисунок 24 – Критерии для алгоритма

В результате по заданному алгоритму удалось построить математические модели по восстановимости и горячей прочности каждого из материалов. Модели для расчета восстановимости представлены формулами (12)-(14):

$$B_A = 0,22MgO + 0,71MnO - 3,06V_2O_5 + 2,21 \quad (12)$$

$$B_O = -0,12MgO + 1,93MnO - 0,17V_2O_5 + 0,79 \quad (13)$$

$$B_{Ж} = -0,26MgO + 0,43MnO - 1,59V_2O_5 + 3,06, \quad (14)$$

где ВА – восстановимость агломерата КГОК, %/мин;  
 ВО – восстановимость окатышей КГОК, %/мин;  
 ВЖ – восстановимость железоблюса ВГОК, %/мин;  
 MgO – содержание MgO, %;  
 MnO – содержание MnO, %;  
 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – содержание V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, %.

Модели для расчета горячей прочности представлены следующими формулами (15)-(17):

$$\Gamma_{\text{ПА}} = -2,82\text{Fe} + 3,73\text{FeO} + 12,85\text{MgO} + 87,12\text{MnO} + 10,36\text{CaO} - 16,76 \quad (15)$$

$$\Gamma_{\text{ПО}} = -6,75\text{FeO} + 3,76\text{MgO} + 124,18 \quad (16)$$

$$\Gamma_{\text{ПЖ}} = -2,56\text{Fe} + 1,73\text{FeO} + 5,19\text{MnO} + 7,26\text{CaO} + 34,29, \quad (17)$$

где ГПА – горячая прочность агломерата КГОК, %/мин;  
 ГПО – горячая прочность окатышей КГОК, %/мин;  
 ГПЖ – горячая прочность железоблюса ВГОК, %/мин;  
 Fe – содержание Fe, %;  
 FeO – содержание FeO, %;  
 CaO – содержание CaO, %.

## **6.2 Расчет горячей прочности и восстановимости по полученным моделям**

Для каждого из материалов при помощи функций пакета Spyder удалось вывести значения MgO, CaO, MnO, Fe, FeO, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> для получения оптимальной прогнозной горячей прочности и восстановимости.

Выведенные значения для агломерата КГОК: MgO = 2,87%, CaO = 10,60%, MnO = 0,21%, Fe = 55,40%, FeO = 12,53%, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> = 0,52%.

Так как содержание Fe напрямую влияет на производительность доменной печи, то снижать его содержание нецелесообразно, поэтому в ущерб горячей прочности требуется максимальное содержание Fe в железорудном

сырье. Снижение  $V_2O_5$  также недопустимо, так как это ценнейший элемент в железорудном сырье, произведенном из титаномагнетитовых руд. Поэтому получать высокую восстановимость за счет снижения содержания  $V_2O_5$  нельзя. Закисные агломераты при содержании FeO не ниже 12% являются оптимальными по восстановимости и горячей прочности.

Ввиду вышесказанного требуется пересмотреть содержание Fe и  $V_2O_5$  в агломерате КГОК. После корректировки значений оптимальный состав агломерата КГОК следующий: MgO = 2,87%, CaO = 10,60%, MnO = 0,21%, Fe = 55,40%, FeO = 12,35%,  $V_2O_5$  = 0,56%. Аналогично рассчитан химический состав для окатышей КГОК и железоблюса ВГОК, содержание Fe и  $V_2O_5$  в них также принято за максимально возможное. Так как Качканарский ГОК производит необлюсованные окатыши, то регулировать их химический состав путем ввода флюсующих добавок не получится. Поэтому оптимальный состав окатышей отличается от базового только содержанием пентаоксида ванадия и монооксида железа, так как FeO можно изменять в процессе окислительного обжига.

В таблицах 12-13 представлены базовый и расчетный состав железорудного сырья по рассматриваемым элементам. За базовый химический состав принят средний состав железорудного сырья за период проведения исследования.

Таблица 12 – Базовый химический состав железорудного сырья, %

Материал	Fe	FeO	MgO	MnO	CaO	$V_2O_5$	SiO <sub>2</sub>	Осн.
Агломерат КГОК	55,12	11,27	2,65	0,19	10,10	0,53	4,13	2,45
Окатыши КГОК	61,00	2,87	2,32	0,23	1,10	0,61	3,68	0,30
Железоблюс ВГОК	48,82	7,89	3,32	0,61	15,47	0,73	5,35	2,89

Таблица 13 – Оптимальный химический состав железорудного сырья, %

Материал	Fe	FeO	MgO	MnO	CaO	$V_2O_5$	SiO <sub>2</sub>	Осн.
Агломерат КГОК	55,40	12,53	2,87	0,21	10,60	0,56	4,13	2,57
Окатыши КГОК	61,20	2,45	2,32	0,23	1,10	0,64	3,68	0,30
Железоблюс ВГОК	50,22	9,10	2,90	0,70	15,98	0,76	5,35	2,99

По формулам (12)-(17) определены восстановимость и горячая прочность железорудных материалов по базовому и расчетному химическому составу, представленные в таблицах 14-15.

Таблица 14 – Базовая и расчетная восстановимость железорудного сырья

Материал	Rt <sub>65</sub> базовый, %/мин	Rt <sub>65</sub> расчетный, %/мин	Δ
Агломерат КГОК	1,28	1,35	0,07
Окатыши КГОК	0,81	0,86	0,05
Железофлюс ВГОК	1,27	1,46	0,19
Итого			0,31

Таблица 15 – Базовая и расчетная горячая прочность железорудного сырья

Материал	LTD <sub>+6,3</sub> базовый, %	LTD <sub>+6,3</sub> расчетный, %	Δ
Агломерат КГОК	25,56	38,43	12,87
Окатыши КГОК	78,18	81,12	2,94
Железофлюс ВГОК	34,37	41,31	6,94
Итого			22,75

Как видно из таблиц, суммарная восстановимость железорудного сырья по расчетным показателям выросла на 0,31%, а суммарная горячая прочность выросла на 22,75%.

### 6.3 Выводы по разделу 6

Отличие расчетного химического состава от базового заключается в следующем:

- содержание Fe в агломерате КГОК по расчетному варианту выше на 0,28%, в железофлюсе ВГОК – выше на 1,40%, в окатышах КГОК – выше на 0,20%,

- содержание FeO в агломерате КГОК стало выше на 0,26%, в железофлюсе ВГОК – выше на 1,21%, а в окатышах КГОК – ниже на 0,42%,

- содержание MgO в агломерате КГОК стало выше на 0,22%, в железофлюсе ВГОК – ниже на 0,42%,

- содержание MnO в агломерате КГОК стало выше на 0,02%, в железофлюсе ВГОК – выше на 0,09%,

- содержание CaO в агломерате КГОК стало выше на 0,50%, в железофлюсе ВГОК – выше на 0,51%,

– содержание  $V_2O_5$  в агломерате КГОК стало выше на 0,03%, в окатышах КГОК и железоблюсе ВГОК – выше также на 0,03%,

– основность агломерата КГОК стала выше на 0,12%, железоблюса ВГОК – выше на 0,10%.

Рекомендации для получения оптимального химического состава:

– необходимо вводить в состав агломерата КГОК доломитизированные добавки, которые повысят содержание  $MgO$  до расчетного значения,

– необходимо добавлять марганцевый концентрат при производстве железоблюса ВГОК и агломерата КГОК для повышения содержания  $MnO$ ,

– необходимо повышать основность железоблюса ВГОК и агломерата КГОК путем добавления дополнительного количества  $CaO$ ,

– необходимо повышать содержание  $FeO$  в железоблюсе ВГОК и агломерате КГОК путем повышения расхода кокса при агломерации, при этом снижать содержание  $FeO$  в окатышах КГОК путем повышения степени окисления окатышей при обжиге,

– регулировать химический состав окатышей КГОК путем ввода доломитизированных добавок, извести и марганцевого концентрата не удастся, так как Качканарский ГОК производит нефлюсованные окатыши.

## 7 РАСЧЕТ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ЧУГУНА И ШЛАКА

По результатам расчетов в предыдущем разделе был принят оптимальный химический состав железорудного сырья. С данным химическим составом железорудные материалы обладают наилучшими свойствами по показателям горячей прочности и восстановимости.

Для утверждения расчетного химического состава агломерата, окатышей и железоблюса необходимо удостовериться, что качество продуктов плавки – чугуна и шлака не ухудшится, то есть будет соответствовать требованиям по химическому составу. Для этого требуется определить:

- состав чугуна – содержание Si, V, Ti, Mn, C, Fe, S, P,
- состав шлака – содержание CaO, SiO<sub>2</sub>, MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, TiO<sub>2</sub>, FeO, P, S и основность CaO/SiO<sub>2</sub>.

Расчет ведется на 1 т чугуна. Методика расчета взята из источника [36]. Доменная плавка ведется на шихте, состоящей из кокса, агломерата и окатышей КГОК, железоблюса ВГОК, металлдобавки ТМ ст. 10–100, доменных брикетов и шлака десульфурации. Также учитывается пылеугольное топливо (ПУТ), входящее в состав комбинированного дутья.

Для начала определяется химический состав чугуна и шлака по базовому варианту. Состав компонентов шихты принимается как среднее арифметическое за период проведения исследования, таким образом базовый вариант – это шихта, использованная в текущем производстве. Удельные расходы компонентов шихты также принимаются как среднее арифметическое за период исследования.

Приняты следующие удельные расходы компонентов шихты:

- расход кокса – 335 кг/т чугуна,
- расход окатышей КГОК – 886,5 кг/т чугуна,
- расход агломерата КГОК – 566,8 кг/т чугуна,
- расход железоблюса ВГОК – 199,8 кг/т чугуна,
- расход ПУТ – 88 кг/т чугуна,

- расход металлодобавки ТМ ст. 10-100 – 33,35 кг/т чугуна,
- расход доменных брикетов – 23,0 кг/т чугуна,
- расход шлака десульфурации – 1,15 кг/т чугуна.

Соотношение агломерата и окатышей – 39:61, соотношение металлодобавки ТМ ст. 10-100, доменных брикетов и шлака десульфурации – 58:40:2 соответственно.

Удельные расходы кокса, смеси агломерата и окатышей, железоблюса, пылеугольного топлива, смеси металлодобавок обозначаются через переменные К, АО, ЖФ, ПУТ, МД.

Содержание в чугуне углерода и кремния задаются в начале расчета: [C]=4,65%, [Si]=0,08%.

### **7.1 Расчет химического состава по базовому варианту**

Для базового расчета химического состава чугуна и шлака в приложении А приведен химический состав компонентов шихты доменной печи. Значения приняты как среднее за период исследования материалов.

Для упрощения расчетов был определен средневзвешенный состав смеси агломерата и окатышей КГОК, а также смеси металлодобавок. Расчетный средневзвешенный состав по базовому варианту представлен в приложении А.

Предварительно необходимо определить в компонентах шихты общее содержание элементов, входящих в состав чугуна, а также частные и суммарную процентные доли их перехода в металл. Значения степеней перехода компонентов в чугун представлены в таблице 16.

Таблица 16 – Степень перехода компонентов в чугун, доли

Fe	Mn	Ti	V	S	P
0,998	0,7	0,06	0,88	0,07	0,97

Общее содержание элементов, входящих в состав чугуна, которые содержатся в компонентах шихты по базовому варианту представлено в таблице 17.

Таблица 17 – Содержание элементов в компонентах шихты по базовому варианту, %

Элемент	К		АО		ЖФ		ПУТ		МД	
	Э <sub>общ</sub>	ηЭ· Э <sub>общ</sub>	Э <sub>общ</sub>	ηЭ· Э <sub>общ</sub>	Э <sub>общ</sub>	ηЭ· Э <sub>общ</sub>	Э <sub>общ</sub>	ηЭ· Э <sub>общ</sub>	Э <sub>общ</sub>	ηЭ· Э <sub>общ</sub>
Fe	0,78	0,78	58,71	58,59	48,82	48,72	0,54	0,54	53,82	53,71
Mn	0	0	0,16	0,11	0,47	0,33	0	0	1,60	1,12
Ti	0	0	1,66	0,10	1,28	0,08	0	0	0,39	0,02
V	0	0	0,32	0,28	0,41	0,36	0	0	0,43	0,38
S	0,490	0,034	0,007	0,001	0,052	0,004	0,390	0,027	0,155	0,011
P	0,043	0,042	0,005	0,005	0,046	0,045	0,061	0,059	0,153	0,149
Итого	–	0,86	–	59,09	–	49,54	–	0,62	–	55,39

Удельный выход чугуна из компонентов шихты определяется по формуле (18):

$$e_{\text{кш}} = \frac{\eta_{\text{Fe}} \cdot \text{Fe}_{\text{общ}}^{\text{кш}} + \eta_{\text{Mn}} \cdot \text{Mn}_{\text{общ}}^{\text{кш}} + \eta_{\text{Ti}} \cdot \text{Ti}_{\text{общ}}^{\text{кш}} + \eta_{\text{V}} \cdot \text{V}_{\text{общ}}^{\text{кш}} + \eta_{\text{S}} \cdot \text{S}_{\text{общ}}^{\text{кш}} + \eta_{\text{P}} \cdot \text{P}_{\text{общ}}^{\text{кш}}}{100 - [\text{C}] - [\text{Si}]}, \quad (18)$$

где  $\text{Fe}_{\text{общ}}^{\text{кш}}$ ,  $\text{Mn}_{\text{общ}}^{\text{кш}}$ ,  $\text{Ti}_{\text{общ}}^{\text{кш}}$ ,  $\text{V}_{\text{общ}}^{\text{кш}}$ ,  $\text{S}_{\text{общ}}^{\text{кш}}$ ,  $\text{P}_{\text{общ}}^{\text{кш}}$  – общее содержание элементов в каждом компоненте шихты;

$\eta_{\text{Fe}}$ ,  $\eta_{\text{Mn}}$ ,  $\eta_{\text{Ti}}$ ,  $\eta_{\text{V}}$ ,  $\eta_{\text{S}}$ ,  $\eta_{\text{P}}$  – степень перехода компонентов в чугун, доли;

$[\text{C}]$  – содержание углерода в чугуне, %;

$[\text{Si}]$  – содержание кремния в чугуне, %.

$$e_{\text{к}} = \frac{0,86}{100 - 4,65 - 0,08} = 0,0090 \text{ кг/кг};$$

$$e_{\text{ао}} = \frac{59,09}{100 - 4,65 - 0,08} = 0,6202 \text{ кг/кг};$$

$$e_{\text{жф}} = \frac{49,54}{100 - 4,65 - 0,08} = 0,5200 \text{ кг/кг};$$

$$e_{\text{пут}} = \frac{0,62}{100 - 4,65 - 0,08} = 0,0065 \text{ кг/кг};$$

$$e_{\text{мд}} = \frac{55,39}{100 - 4,65 - 0,08} = 0,5814 \text{ кг/кг};$$

Удельный выход шлака из каждого компонента шихты определяется по формуле (19):

$$u^{кш} = 0,01(CaO^{кш} + MgO^{кш} + Al_2O_3^{кш} + SiO_2^{кш} - [Si] \cdot e_{кш} \frac{60}{28} + \mu_{Mn} \cdot MnO^{кш} + \\ + \mu_V \cdot V_2O_5^{кш} + \mu_{Ti} \cdot TiO_2^{кш} + 0,5 \cdot \mu_S \cdot S^{кш} + \mu_P \cdot P^{кш} + \mu_{Fe} \cdot Fe_{общ}^{кш} \cdot \frac{72}{56}), \quad (19)$$

где  $CaO^{кш}$ ,  $MgO^{кш}$ ,  $Al_2O_3^{кш}$ ,  $SiO_2^{кш}$ ,  $MnO^{кш}$ ,  $V_2O_5^{кш}$ ,  $TiO_2^{кш}$ ,  $S^{кш}$ ,  $P^{кш}$  – содержание элементов в каждом компоненте шихты, %;

$\mu_{Fe}$ ,  $\mu_{Mn}$ ,  $\mu_{Ti}$ ,  $\mu_V$ ,  $\mu_S$ ,  $\mu_P$  – степень перехода компонентов в шлак, доли.

Значения степеней перехода компонентов в шлак представлены в таблице 18.

Таблица 18 – Степень перехода компонентов в шлак, доли

Fe	Mn	Ti	V	S	P
0,002	0,29	0,94	0,10	0,90	0,002

$$u^k = 0,01(0,64 + 0,2 + 2,31 + 5,68 - 0,08 \cdot 0,009 \cdot 2,14 + 0,29 \cdot 0 + 0,1 \cdot 0 + \\ + 0,94 \cdot 0 + 0,5 \cdot 0,9 \cdot 0,49 + 0,02 \cdot 0,043 + 0,002 \cdot 0,78 \cdot 1,29) = 0,0905;$$

$$u^{ao} = 0,01(4,61 + 2,45 + 2,47 + 3,86 - 0,08 \cdot 0,62 \cdot 2,14 + 0,29 \cdot 0,2 + 0,1 \cdot \\ \cdot 0,58 + 0,94 \cdot 2,77 + 0,9 \cdot 0,007 + 0,02 \cdot 0,005 + 0,002 \cdot 58,71 \cdot 1,29) = 0,1615;$$

$$u^{жф} = 0,01(15,47 + 3,32 + 2,55 + 5,35 - 0,08 \cdot 0,52 \cdot 2,14 + 0,29 \cdot 0,61 + 0,1 \cdot \\ \cdot 0,73 + 0,94 \cdot 2,13 + 0,9 \cdot 0,052 + 0,02 \cdot 0,046 + 0,002 \cdot 48,82 \cdot 1,29) = 0,2903;$$

$$u^{пут} = 0,01(0,68 + 0,18 + 1,76 + 3,29 - 0,08 \cdot 0,007 \cdot 2,14 + 0,29 \cdot 0 + 0,1 \cdot 0 + \\ + 0,94 \cdot 0 + 0,5 \cdot 0,9 \cdot 0,39 + 0,02 \cdot 0,061 + 0,002 \cdot 0,54 \cdot 1,29) = 0,0608;$$

$$u^{мд} = 0,01(12,77 + 6,51 + 2,39 + 8,63 - 0,08 \cdot 0,581 \cdot 2,14 + 0,29 \cdot 2,08 + 0,1 \cdot \\ \cdot 0,77 + 0,94 \cdot 0,64 + 0,9 \cdot 0,16 + 0,02 \cdot 0,153 + 0,002 \cdot 53,82 \cdot 1,29) = 0,3175.$$

Химический состав чугуна определяется по формулам (20)-(25):

$$[V] = (102/182000) \cdot \eta_V \cdot (K \cdot V_2O_5^k + AO \cdot V_2O_5^{ao} + ЖФ \cdot V_2O_5^{жф} + \\ + ПУТ \cdot V_2O_5^{пут} + МД \cdot V_2O_5^{мд}); \quad (20)$$

$$[Mn] = (55/71000) \cdot \eta_{Mn} \cdot (K \cdot MnO^k + AO \cdot MnO^{ao} + ЖФ \cdot MnO^{жф} + \\ + ПУТ \cdot MnO^{пут} + МД \cdot MnO^{мд}); \quad (21)$$

$$[Ti] = (48/80000) \cdot \eta_{Ti} \cdot (K \cdot TiO_2^k + AO \cdot TiO_2^{ao} + ЖФ \cdot TiO_2^{жф} +$$

$$+ \text{ПУТ} \cdot \text{TiO}_2^{\text{ПУТ}} + \text{МД} \cdot \text{TiO}_2^{\text{МД}}); \quad (22)$$

$$[\text{S}] = (\eta_{\text{S}}/1000) \cdot (\text{K} \cdot \text{S}^{\text{K}} + \text{АО} \cdot \text{S}^{\text{АО}} + \text{ЖФ} \cdot \text{S}^{\text{ЖФ}} + \text{ПУТ} \cdot \text{S}^{\text{ПУТ}} + \text{МД} \cdot \text{S}^{\text{МД}}); \quad (23)$$

$$[\text{P}] = (\eta_{\text{P}}/1000) \cdot (\text{K} \cdot \text{P}_2\text{O}_5^{\text{K}} + \text{АО} \cdot \text{P}_2\text{O}_5^{\text{АО}} + \text{ЖФ} \cdot \text{P}_2\text{O}_5^{\text{ЖФ}} + \\ + \text{ПУТ} \cdot \text{P}_2\text{O}_5^{\text{ПУТ}} + \text{МД} \cdot \text{P}_2\text{O}_5^{\text{МД}}); \quad (24)$$

$$[\text{Fe}] = 100 - [\text{C}] - [\text{Si}] - [\text{Mn}] - [\text{S}] - [\text{P}] - [\text{V}] - [\text{Ti}], \quad (25)$$

где К – удельный расход кокса, кг/т чугуна;

АО – удельный расход смеси агломерата и окатышей, кг/т чугуна;

ЖФ – удельный расход железоблюха, кг/т чугуна;

ПУТ – удельный расход пылеугольного топлива, кг/т чугуна;

МД – удельный расход смеси металлдобавок, кг/т чугуна;

[Mn], [S], [P], [V], [Ti], [Fe] – содержание элементов в чугуне.

$$[\text{V}] = (102/182000) \cdot 0,88 \cdot (335 \cdot 0 + 1453,3 \cdot 0,58 + 199,8 \cdot 0,73 + \\ + 88 \cdot 0 + 57,5 \cdot 0,77) = 0,506 \ %;$$

$$[\text{Mn}] = (55/71000) \cdot 0,7 \cdot (335 \cdot 0 + 1453,3 \cdot 0,20 + 199,8 \cdot 0,61 + \\ + 88 \cdot 0 + 57,5 \cdot 2,08) = 0,29 \ %;$$

$$[\text{Ti}] = (48/80000) \cdot 0,06 \cdot (335 \cdot 0 + 1453,3 \cdot 2,77 + 199,8 \cdot 2,13 + \\ + 88 \cdot 0 + 57,5 \cdot 0,64) = 0,16 \ %;$$

$$[\text{S}] = (0,07/1000) \cdot (335 \cdot 0,49 + 1453,3 \cdot 0,007 + 199,8 \cdot 0,052 + \\ + 88 \cdot 0,39 + 57,5 \cdot 0,155) = 0,016 \ %;$$

$$[\text{P}] = (0,97/1000) \cdot (335 \cdot 0,043 + 1453,3 \cdot 0,005 + 199,8 \cdot 0,046 + \\ + 88 \cdot 0,061 + 57,5 \cdot 0,153) = 0,043 \ %;$$

$$[\text{Fe}] = 100 - 4,65 - 0,08 - 0,29 - 0,016 - 0,043 - 0,506 - 0,16 = 94,25 \ %.$$

Химический состав чугуна по базовому варианту приведен в таблице 19.

Таблица 19 – Химический состав чугуна по базовому варианту, %

[C]	[Si]	[V]	[Mn]	[Ti]	[S]	[P]	[Fe]
4,65	0,08	0,506	0,29	0,16	0,016	0,043	94,25

Удельный выход шлака определяется по формуле (26):

$$U = K \cdot u^k + AO \cdot u^{ao} + ЖФ \cdot u^{жф} + ПУТ \cdot u^{пут} + МД \cdot u^{мд}. \quad (26)$$

$$U = 335 \cdot 0,0905 + 1453,3 \cdot 0,1614 + 199,8 \cdot 0,2901 + 88 \cdot 0,0608 + 57,5 \cdot 0,3175 = \\ = 346,45 \text{ кг/т чугуна.}$$

Химический состав шлака определяется по формулам (27)-(36):

$$(CaO) = (K \cdot CaO^k + AO \cdot CaO^{ao} + ЖФ \cdot CaO^{жф} + \\ + ПУТ \cdot CaO^{пут} + МД \cdot CaO^{мд})/U; \quad (27)$$

$$(MgO) = (K \cdot MgO^k + AO \cdot MgO^{ao} + ЖФ \cdot MgO^{жф} + \\ + ПУТ \cdot MgO^{пут} + МД \cdot MgO^{мд})/U; \quad (28)$$

$$(Al_2O_3) = (K \cdot Al_2O_3^k + AO \cdot Al_2O_3^{ao} + ЖФ \cdot Al_2O_3^{жф} + \\ + ПУТ \cdot Al_2O_3^{пут} + МД \cdot Al_2O_3^{мд})/U; \quad (29)$$

$$(SiO_2) = (K \cdot SiO_2^k + AO \cdot SiO_2^{ao} + ЖФ \cdot SiO_2^{жф} + ПУТ \cdot SiO_2^{пут} + \\ + МД \cdot SiO_2^{мд} - (60/28) \cdot [Si] \cdot 1000)/U; \quad (30)$$

$$(TiO_2) = \mu_{Ti}(K \cdot TiO_2^k + AO \cdot TiO_2^{ao} + ЖФ \cdot TiO_2^{жф} + \\ + ПУТ \cdot TiO_2^{пут} + МД \cdot TiO_2^{мд})/U; \quad (31)$$

$$(P_2O_5) = (142/62)\mu_P(K \cdot P^k + AO \cdot P^{ao} + ЖФ \cdot P^{жф} + ПУТ \cdot P^{пут} + МД \cdot P^{мд})/U; \\ (32)$$

$$(MnO) = \mu_{Mn}(K \cdot MnO^k + AO \cdot MnO^{ao} + ЖФ \cdot MnO^{жф} + \\ + ПУТ \cdot MnO^{пут} + МД \cdot MnO^{мд})/U; \quad (33)$$

$$(V_2O_5) = \mu_V(K \cdot V_2O_5^k + AO \cdot V_2O_5^{ao} + ЖФ \cdot V_2O_5^{жф} + \\ + ПУТ \cdot V_2O_5^{пут} + МД \cdot V_2O_5^{мд})/U; \quad (34)$$

$$(FeO) = (72/56)\mu_{Fe}(K \cdot Fe_{общ}^k + AO \cdot Fe_{общ}^{ao} + ЖФ \cdot Fe_{общ}^{жф} + \\ + ПУТ \cdot Fe_{общ}^{пут} + МД \cdot Fe_{общ}^{мд})/U; \quad (35)$$

$$(S) = \mu_S(K \cdot S^k + AO \cdot S^{ao} + ЖФ \cdot S^{жф} + ПУТ \cdot S^{пут} + МД \cdot S^{мд})/U. \quad (36)$$

$$(CaO) = (335 \cdot 0,64 + 1453,3 \cdot 4,61 + 199,8 \cdot 15,47 + 88 \cdot 0,68 + \\ + 57,5 \cdot 12,77)/346,63 = 31,16 \%;$$

$$(MgO) = (335 \cdot 0,20 + 1453,3 \cdot 2,45 + 199,8 \cdot 3,32 + 88 \cdot 0,18 +$$

$$\begin{aligned}
& + 57,5 \cdot 6,51) / 346,63 = 13,49 \% ; \\
(\text{Al}_2\text{O}_3) &= (335 \cdot 2,31 + 1453,3 \cdot 2,47 + 199,8 \cdot 2,55 + 88 \cdot 1,76 + \\
& + 57,5 \cdot 2,39) / 346,63 = 14,88 \% ; \\
(\text{SiO}_2) &= (335 \cdot 5,68 + 1453,3 \cdot 3,86 + 199,8 \cdot 5,35 + 88 \cdot 3,29 + \\
& + 57,5 \cdot 8,63 - 60 \cdot 0,08 \cdot 1000 / 28) / 346,63 = 26,51 \% ; \\
(\text{TiO}_2) &= 0,94 \cdot (335 \cdot 0 + 1453,3 \cdot 2,77 + 199,8 \cdot 2,13 + 88 \cdot 0 + \\
& + 57,5 \cdot 0,64) / 346,63 = 12,17 \% ; \\
(\text{P}_2\text{O}_5) &= (142 / 62) \cdot 0,02 \cdot (335 \cdot 0,043 + 1453,3 \cdot 0,005 + 199,8 \cdot 0,046 + 88 \cdot 0,61 + \\
& + 57,5 \cdot 0,153) / 346,63 = 0,006 \% ; \\
(\text{MnO}) &= 0,29 \cdot (335 \cdot 0 + 1453,3 \cdot 0,20 + 199,8 \cdot 0,61 + 88 \cdot 0 + \\
& + 57,5 \cdot 2,08) / 346,63 = 0,45 \% ; \\
(\text{V}_2\text{O}_5) &= 0,1 \cdot (335 \cdot 0 + 1453,3 \cdot 0,58 + 199,8 \cdot 0,73 + 88 \cdot 0 + \\
& + 57,5 \cdot 0,77) / 346,63 = 0,30 \% ; \\
(\text{FeO}) &= (72 / 56) \cdot 0,002 \cdot (335 \cdot 0,78 + 1453,3 \cdot 58,71 + 199,8 \cdot 48,82 + 88 \cdot 0,54 + \\
& + 57,5 \cdot 53,82) / 346,63 = 0,73 \% ; \\
(\text{S}) &= 0,9 \cdot (335 \cdot 0,49 + 1453,3 \cdot 0,007 + 199,8 \cdot 0,052 + 88 \cdot 0,39 + \\
& + 57,5 \cdot 0,155) / 346,63 = 0,59 \% .
\end{aligned}$$

Химический состав шлака по базовому варианту приведен в таблице 20.

Таблица 20 – Химический состав шлака по базовому варианту, %

(CaO)	(MgO)	(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	(SiO <sub>2</sub> )	(TiO <sub>2</sub> )	(MnO)	(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	(V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	(FeO)	(S)	Осн.
31,16	13,49	14,88	26,51	12,17	0,45	0,006	0,30	0,73	0,59	1,18

Рассчитанный состав шлака по базовому варианту соответствует реальному шлаку, получаемому в доменном цехе АО «ЕВРАЗ НТМК».

## 7.2 Расчет химического состава по оптимальным параметрам

В железорудных материалах изменено содержание Fe, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, MgO, MnO, CaO и FeO. Удельные расходы компонентов шихты, а также химический состав металлодобавок и топлива остаются такими же, как в базовом варианте расчета. Для расчета химического состава чугуна и шлака по оптимальным параметрам в приложении Б приведен химический состав компонентов шихты доменной печи. Средневзвешенный состав смеси агломерата и окатышей,

а также смеси металлодобавок по расчетному варианту представлен в приложении Б.

Общее содержание элементов, входящих в состав чугуна, которые содержатся в компонентах шихты по расчетному варианту представлено в таблице 21.

Таблица 21 – Содержание элементов в компонентах шихты по расчетному варианту, %

Элемент	К		АО		ЖФ		ПУТ		МД	
	Э <sub>общ</sub>	η <sub>э</sub> Э <sub>общ</sub>	Э <sub>общ</sub>	η <sub>э</sub> Э <sub>общ</sub>	Э <sub>общ</sub>	η <sub>э</sub> Э <sub>общ</sub>	Э <sub>общ</sub>	η <sub>э</sub> Э <sub>общ</sub>	Э <sub>общ</sub>	η <sub>э</sub> Э <sub>общ</sub>
Fe	0,78	0,78	58,82	58,70	50,22	50,12	0,54	0,54	53,82	53,71
Mn	0	0	0,16	0,11	0,54	0,38	0	0	1,60	1,12
Ti	0	0	1,66	0,10	1,28	0,08	0	0	0,39	0,02
V	0	0	0,34	0,30	0,43	0,37	0	0	0,43	0,38
S	0,490	0,034	0,007	0,001	0,052	0,004	0,390	0,027	0,155	0,011
P	0,043	0,042	0,005	0,005	0,046	0,045	0,061	0,059	0,153	0,149
Итого	–	0,86	–	59,22	–	51,00	–	0,62	–	55,39

Удельный выход чугуна из компонентов шихты по расчетному варианту:

$$e_k = \frac{0,86}{100 - 4,65 - 0,08} = 0,0090 \text{ кг/кг};$$

$$e_{ao} = \frac{59,22}{100 - 4,65 - 0,08} = 0,6216 \text{ кг/кг};$$

$$e_{жф} = \frac{51,00}{100 - 4,65 - 0,08} = 0,5353 \text{ кг/кг};$$

$$e_{пут} = \frac{0,62}{100 - 4,65 - 0,08} = 0,0065 \text{ кг/кг}.$$

$$e_{мд} = \frac{55,39}{100 - 4,65 - 0,08} = 0,5814 \text{ кг/кг}.$$

Удельный выход шлака из каждого компонента шихты по расчетному варианту:

$$u^k = 0,01(0,64 + 0,2 + 2,31 + 5,68 - 0,08 \cdot 0,009 \cdot 2,14 + 0,29 \cdot 0 + 0,1 \cdot 0 + 0,94 \cdot 0 + 0,5 \cdot 0,9 \cdot 0,49 + 0,02 \cdot 0,043 + 0,002 \cdot 0,78 \cdot 1,29) = 0,0905;$$

$$\begin{aligned}
u^{ao} &= 0,01(4,81 + 2,53 + 2,47 + 3,86 - 0,08 \cdot 0,62 \cdot 2,14 + 0,29 \cdot 0,21 + 0,1 \cdot \\
&\cdot 0,61 + 0,94 \cdot 2,77 + 0,9 \cdot 0,007 + 0,02 \cdot 0,005 + 0,002 \cdot 58,82 \cdot 1,29) = 0,1643; \\
u^{жф} &= 0,01(15,98 + 2,90 + 2,55 + 5,35 - 0,08 \cdot 0,54 \cdot 2,14 + 0,29 \cdot 0,70 + 0,1 \cdot \\
&\cdot 0,76 + 0,94 \cdot 2,13 + 0,9 \cdot 0,052 + 0,02 \cdot 0,046 + 0,002 \cdot 50,22 \cdot 1,29) = 0,2913; \\
u^{пвт} &= 0,01(0,68 + 0,18 + 1,76 + 3,29 - 0,08 \cdot 0,007 \cdot 2,14 + 0,29 \cdot 0 + 0,1 \cdot 0 + \\
&+ 0,94 \cdot 0 + 0,5 \cdot 0,9 \cdot 0,39 + 0,02 \cdot 0,061 + 0,002 \cdot 0,54 \cdot 1,29) = 0,0608; \\
u^{мл} &= 0,01(12,77 + 6,51 + 2,39 + 8,63 - 0,08 \cdot 0,581 \cdot 2,14 + 0,29 \cdot 2,08 + 0,1 \cdot \\
&\cdot 0,77 + 0,94 \cdot 0,64 + 0,9 \cdot 0,16 + 0,02 \cdot 0,153 + 0,002 \cdot 53,82 \cdot 1,29) = 0,3175.
\end{aligned}$$

Химический состав чугуна по расчетному варианту:

$$[V] = (102/182000) \cdot 0,88 \cdot (335 \cdot 0 + 1453,3 \cdot 0,61 + 199,8 \cdot 0,76 + 88 \cdot 0 + 57,5 \cdot 0,77) = 0,533 \% ;$$

$$[Mn] = (55/71000) \cdot 0,7 \cdot (335 \cdot 0 + 1453,3 \cdot 0,21 + 199,8 \cdot 0,70 + 88 \cdot 0 + 57,5 \cdot 2,08) = 0,31 \% ;$$

$$[Ti] = (48/80000) \cdot 0,06 \cdot (335 \cdot 0 + 1453,3 \cdot 2,77 + 199,8 \cdot 2,13 + 88 \cdot 0 + 57,5 \cdot 0,64) = 0,16 \% ;$$

$$[S] = (0,07/1000) \cdot (335 \cdot 0,49 + 1453,3 \cdot 0,007 + 199,8 \cdot 0,052 + 88 \cdot 0,39 + 57,5 \cdot 0,155) = 0,016 \% ;$$

$$[P] = (0,97/1000) \cdot (335 \cdot 0,043 + 1453,3 \cdot 0,005 + 199,8 \cdot 0,046 + 88 \cdot 0,061 + 57,5 \cdot 0,153) = 0,043 \% ;$$

$$[Fe] = 100 - 4,65 - 0,08 - 0,29 - 0,016 - 0,043 - 0,506 - 0,16 = 94,21 \% .$$

Химический состав чугуна по расчетному варианту приведен в таблице 22.

Таблица 22 – Химический состав чугуна по расчетному варианту, %

[C]	[Si]	[V]	[Mn]	[Ti]	[S]	[P]	[Fe]
4,65	0,08	0,533	0,31	0,16	0,016	0,043	94,21

Удельный выход шлака по расчетному варианту:

$$\begin{aligned}
U &= 335 \cdot 0,0905 + 1453,3 \cdot 0,1643 + 199,8 \cdot 0,2913 + 88 \cdot 0,0608 + 57,5 \cdot 0,3175 = \\
&= 350,85 \text{ кг/т чугуна.}
\end{aligned}$$

Химический состав шлака по расчетному варианту:

$$\begin{aligned}
(\text{CaO}) &= (335 \cdot 0,64 + 1453,3 \cdot 4,81 + 199,8 \cdot 15,98 + 88 \cdot 0,68 + \\
&+ 57,5 \cdot 12,77) / 350,85 = 31,88 \% ;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
(\text{MgO}) &= (335 \cdot 0,20 + 1453,3 \cdot 2,53 + 199,8 \cdot 2,90 + 88 \cdot 0,18 + \\
&\quad + 57,5 \cdot 6,51) / 350,85 = 13,45 \% ; \\
(\text{Al}_2\text{O}_3) &= (335 \cdot 2,31 + 1453,3 \cdot 2,47 + 199,8 \cdot 2,55 + 88 \cdot 1,76 + \\
&\quad + 57,5 \cdot 2,39) / 350,85 = 14,70 \% ; \\
(\text{SiO}_2) &= (335 \cdot 5,68 + 1453,3 \cdot 3,86 + 199,8 \cdot 5,35 + 88 \cdot 3,29 + \\
&\quad + 57,5 \cdot 8,63 - 60 \cdot 0,08 \cdot 1000 / 28) / 350,85 = 26,19 \% ; \\
(\text{TiO}_2) &= 0,94 \cdot (335 \cdot 0 + 1453,3 \cdot 2,77 + 199,8 \cdot 2,13 + 88 \cdot 0 + \\
&\quad + 57,5 \cdot 0,64) / 350,85 = 12,02 \% ; \\
(\text{P}_2\text{O}_5) &= (142 / 62) \cdot 0,02 \cdot (335 \cdot 0,043 + 1453,3 \cdot 0,005 + 199,8 \cdot 0,046 + 88 \cdot 0,61 + \\
&\quad + 57,5 \cdot 0,153) / 350,85 = 0,006 \% ; \\
(\text{MnO}) &= 0,29 \cdot (335 \cdot 0 + 1453,3 \cdot 0,21 + 199,8 \cdot 0,70 + 88 \cdot 0 + \\
&\quad + 57,5 \cdot 2,08) / 350,85 = 0,47 \% ; \\
(\text{V}_2\text{O}_5) &= 0,1 \cdot (335 \cdot 0 + 1453,3 \cdot 0,61 + 199,8 \cdot 0,76 + 88 \cdot 0 + \\
&\quad + 57,5 \cdot 0,77) / 350,85 = 0,31 \% ; \\
(\text{FeO}) &= (72 / 56) \cdot 0,002 \cdot (335 \cdot 0,78 + 1453,3 \cdot 58,82 + 199,8 \cdot 50,22 + 88 \cdot 0,54 + \\
&\quad + 57,5 \cdot 53,82) / 350,85 = 0,72 \% ; \\
(\text{S}) &= 0,9 \cdot (335 \cdot 0,49 + 1453,3 \cdot 0,007 + 199,8 \cdot 0,052 + 88 \cdot 0,39 + \\
&\quad + 57,5 \cdot 0,155) / 350,85 = 0,59 \% .
\end{aligned}$$

Химический состав шлака по расчетному варианту приведен в таблице 23.

Таблица 23 – Химический состав шлака по расчетному варианту, %

(CaO)	(MgO)	(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	(SiO <sub>2</sub> )	(TiO <sub>2</sub> )	(MnO)	(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	(V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	(FeO)	(S)	Осн.
31,88	13,45	14,70	26,19	12,02	0,47	0,006	0,31	0,72	0,59	1,22

Химический состав шлака по расчетному варианту не изменился в худшую сторону. Его основность стала выше на 0,04 ед., однако такая основность входит в заданные нормативы (1,15-1,25 ед.).

### 7.3 Выводы по разделу 7

Содержание Si в чугуне в расчетном варианте не изменилось от базового, так как он задавался перед расчетом и остался на уровне 0,08%. Содержание ванадия выросло на 0,027%, так как расчетный вариант

подразумевает максимальное содержание  $V_2O_5$  в сырье. Также выросло содержание марганца с 0,29 до 0,31% за счет повышения содержания  $MnO$  в агломерате КГОК и железоблюсе ВГОК. Рост марганца в чугуна не выходит за рамки требований конвертерного цеха – не более 0,40%. Содержание фосфора и серы не изменилось, поэтому качество чугуна не ухудшилось. Однако за счет увеличения в чугуна содержания марганца и ванадия содержание железа снизилось на 0,04%.

У конечного шлака повысится основность с 1,18 до 1,22 за счет повышения содержания  $CaO$  в агломерате КГОК и железоблюсе ВГОК. Однако такая основность входит в заданные пределы от 1,15 до 1,25. Содержание  $MgO$  в шлаке снизится на 0,04% за счет снижения содержания магнезии в железоблюсе ВГОК, поэтому вязкость шлака не повысится.

Оптимальный состав железорудного сырья не ухудшает конечный химический состав продуктов плавки – чугуна и шлака, однако повышает горячую прочность и восстановимость сырья.

## 8 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЕКТА

Как было установлено в предыдущем разделе оптимальный состав железорудного сырья не ухудшает конечный химический состав чугуна и шлака, при этом повышая горячую прочность и восстановимость сырья. Повышение горячей прочности предотвращает образование мелочи в столбе доменной шихты в процессе восстановления. Повышение восстановимости снижает удельный расход кокса или удельный расход суммарного топлива.

Согласно источнику [37] повышение восстановимости железорудных материалов на 1% снижает удельный расход кокса на 1,5 кг/т чугуна. Как было установлено в разделе 6 – суммарная восстановимость железорудного сырья повысилась на 0,31%, что приведет к снижению удельного расхода кокса на 0,46 кг/т чугуна.

Экономическая эффективность предлагаемого мероприятия оценивается по упрощенной методике, согласно [38].

### 8.1 Определение изменения показателей производства чугуна после внедрения технологии

Определение фактического рабочего времени производится по формуле (37):

$$T_{\text{факт}} = T_{\text{к}} - T_{\text{кап.рем}} - T_{\text{тек.пр}} - T_{\text{пр}} - T_{\text{вых}}, \quad (37)$$

где  $T_{\text{к}}$  – календарное время, дн.;

$T_{\text{кап.рем}}$  – время капитальных ремонтов, дн.;

$T_{\text{тек.пр}}$  – время текущих простоев, дн.;

$T_{\text{пр}}$  – время праздничных дней, дн.;

$T_{\text{вых}}$  – время выходных дней, дн.

Доменные печи работают без выходных и праздников. Текущие простои на капитальные ремонты составляют 10 дн./год.

Фактическое время работы доменных печей составит:

$$T_{\text{факт}} = 365 - 10 = 355 \text{ дн.}$$

Производство чугуна в 2023 г составило 5,151 млн. т при фактическом времени работы 355 дн./год.

Повышение восстановимости железорудного сырья снизит удельный расход кокса на 0,46 кг/т чугуна. Годовой объем производства чугуна после внедрения технологии не изменится.

## 8.2 Расчет изменения себестоимости

Существующая себестоимость чугуна представлена в таблице 24.

Таблица 24 – Калькуляция себестоимости 1 т ванадиевого чугуна в 2023 г

Наименование статей и затрат	Цена, руб.	Кол-во, т/т	Сумма, руб
Сырье (ЖРС):			
Агломерат КГОК	7300	0,567	4139,10
Окатыши КГОК	8100	0,887	7184,70
Железофлюс	6350	0,200	1270,00
Металлодобавка ТМ ст. 10-100	2570	0,033	84,81
Доменные брикеты	4150	0,023	95,45
Энергозатраты:			
Кокс скиповый	23500	0,335	7872,50
Природный газ	5000	0,105	525,00
ПУТ	9800	0,088	862,40
Итого	-	-	22033,96
Побочная продукция (аглоотсев)	4700	0,032	-150,4
Основная з/п производственных рабочих	-	-	8,11
Социальные взносы	-	-	2,76
Общепроизводственные расходы	-	-	20,28
Общехозяйственные расходы	-	-	25,15
Итого производственная с/с	-	-	21939,86
Коммерческие расходы	-	-	34,07
Итого полная с/с	-	-	21973,93

В расчете проектной себестоимости учтено снижение удельного расхода ПУТ, остальные статьи затрат не изменяются.

Расчет ожидаемой проектной себестоимости приведен в таблице 25.

Таблица 25 – Проектная калькуляция себестоимости 1 т ванадиевого чугуна

Наименование статей и затрат	Цена, руб.	Кол-во, т/т	Сумма, руб
<b>Сырье (ЖРС):</b>			
Агломерат КГОК	7300	0,567	4139,10
Окатыши КГОК	8100	0,887	7184,70
Железофлюс	6350	0,200	1270,00
Металлодобавка ТМ ст. 10-100	2570	0,033	84,81
Доменные брикеты	4150	0,023	95,45
<b>Энергозатраты:</b>			
Кокс скиповый	23500	0,3345	7860,75
Природный газ	5000	0,105	525,00
ПУТ	9800	0,088	862,40
Итого	-	-	22022,21
Побочная продукция (аглоотсев)	4700	0,032	-150,4
Основная з/п производственных рабочих	-	-	8,11
Социальные взносы	-	-	2,76
Общепроизводственные расходы	-	-	20,28
Общехозяйственные расходы	-	-	25,15
Итого производственная с/с	-	-	21928,11
Коммерческие расходы	-	-	34,07
Итого полная с/с	-	-	21962,18

Изменение себестоимости определяется по формуле (38):

$$\Delta C = C_{\text{пр}} - C_{\text{баз}}, \quad (38)$$

где  $C_{\text{пр}}$  – себестоимость проектная, руб.;

$C_{\text{баз}}$  – себестоимость базовая, руб.

$$\Delta C = 21962,18 - 21973,93 = - 11,75 \text{ руб.}$$

### 8.3 Расчет условно-годовой экономии

Расчет условно-годовой экономии ( $\mathcal{E}_{\text{уг}}$ ) производится по формуле (39):

$$\mathcal{E}_{\text{уг}} = \Delta C \cdot V - E_{\text{н}} \cdot K_{\text{н}}, \quad (39)$$

где  $\Delta C$  – изменение себестоимости чугуна (затрат на производство) после внедрения мероприятий (новой технологии), руб/т;

$V$  – объем производства после внедрения технологии, млн т/год;

$E_n$  – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений, ед;

$K_n$  – капитальные вложения, млн руб.

Капитальные вложения по данному проекту не требуются, поэтому условно-годовая экономия рассчитывается более упрощенно по формуле (40):

$$\text{Э}_{\text{УГ}} = \Delta C \cdot V. \quad (40)$$

Условно-годовая экономия составит:

$$\text{Э}_{\text{УГ}} = 11,75 \cdot 5,151 = 60,52 \text{ млн руб.}$$

#### 8.4 Расчет прибыли

Расчет прибыли ( $\Pi$ ) осуществляется по формуле (41):

$$\Pi = (C - C_c) \cdot V, \quad (41)$$

где  $C$  – оптовая цена 1 т чугуна, руб./т ( $C = 26360$  руб./т);

$C_c$  – себестоимость продукции, руб./т.

Прибыль до внедрения технологии составляла:

$$\Pi_{\text{БАЗ}} = (26360 - 21973,93) \cdot 5,151 = 22592,65 \text{ млн руб./год}$$

Прибыль после внедрения проекта составит:

$$\Pi_{\text{ПР}} = (26360 - 21962,18) \cdot 5,151 = 22653,17 \text{ млн руб./год.}$$

Прирост прибыли  $\Delta\Pi$  рассчитывается по формуле (42):

$$\Delta\Pi = \Pi_{\text{ПР}} - \Pi_{\text{БАЗ}}. \quad (42)$$

Прирост прибыли  $\Delta\Pi$  составит:

$$\Delta\Pi = 22653,17 - 22592,65 = 60,52 \text{ млн руб./год.}$$

## 8.5 Расчет показателей фондоотдачи и фондоемкости

Расчет показателя фондоотдачи ( $\Phi_o$ ) осуществляется по формуле (43):

$$\Phi_o = \frac{V \cdot \Pi}{\text{ОФ}}, \quad (43)$$

где ОФ – стоимость основных фондов, млн руб. (ОФ = 23504 млн руб.).

До и после внедрения технологии фондоотдача составляет:

$$\Phi_o = \frac{5,151 \cdot 26360}{23504} = 5,78 \text{ руб./руб.}$$

Расчет показателя фондоемкости осуществляется по формуле (44):

$$\Phi_{\text{емк}} = \frac{1}{\Phi_o}. \quad (44)$$

До и после внедрения технологии фондоемкость составляет:

$$\Phi_o = \frac{1}{5,78} = 0,17 \text{ руб./руб.}$$

## 8.6 Расчет рентабельности продукции

Расчет рентабельности продукции (R) производится по формуле (45):

$$R = \frac{\Pi}{(C_c \cdot V)} \cdot 100\%. \quad (45)$$

Рентабельность продукции до внедрения составляла:

$$R_{\text{баз}} = \frac{22592,65}{21973,93 \cdot 5,151} \cdot 100\% = 19,96\%$$

Рентабельность продукции после внедрения мероприятий составит:

$$R_{\text{пр}} = \frac{22653,17}{21962,18 \cdot 5,151} \cdot 100\% = 20,02\%$$

Технико-экономические показатели проекта по повышению восстановимости железорудного сырья в доменном цехе АО «ЕВРАЗ НТМК» в сравнении с существующими сведены в таблицу 26.

Таблица 26 – Технико-экономические показатели внедрения проекта по повышению восстановимости железорудного сырья

Показатели	Единица измерения	Базовый вариант	Проектный вариант
Производство чугуна	млн т/год	5,151	5,151
Себестоимость 1 т чугуна	руб	21973,93	21962,18
Рентабельность продукции	%	19,96	20,02
Фондоотдача	руб/руб	5,78	5,78
Фондоемкость	руб/руб	0,17	0,17
Прибыль от реализации	млн руб/год	22592,65	22653,17
Условно-годовая экономия	млн руб	–	60,52

Выполненные расчеты наглядно доказывают экономическую целесообразность проекта по повышению восстановимости железорудного сырья:

- прибыль увеличивается на 60,52 млн. руб/год или на 0,27 % от базового уровня,
- рентабельность повышается на 0,06 %,
- себестоимость 1 т чугуна снижается на 11,75 руб,
- условно-годовая экономия составляет 60,52 млн. руб/год.

При этом капитальные затраты на внедрение данного мероприятия не требуются.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе было выявлено влияние химического состава железорудного сырья на его горячую прочность и восстановимость, на основе полученных зависимостей были построены математические модели по определению горячей прочности и восстановимости для каждого из материалов по их химическому составу. Рассчитан оптимальный химический состав железорудного сырья, а также установлено, что сырье с высокой восстановимостью и прочностью при восстановлении не ухудшает качество чугуна и шлака.

С увеличением содержания MgO в агломерате КГОК возрастает горячая прочность, так как MgO образует магнезиовюстит, повышающий прочность готового продукта. Также магнезия повышает его восстановимость. С ростом FeO горячая прочность агломерата КГОК также растет, в связи с тем, что закисные агломераты обладают более высокой горячей прочностью. Повышение основности и MnO в агломерате положительно влияет на горячую прочность. V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> снижает восстановимость агломерата КГОК, так как восстановление пентаоксида ванадия до V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> протекает труднее, чем восстановление железа. Входящий в состав агломерата КГОК MnO положительно влияет на восстановимость, так как косвенное восстановление высших оксидов марганца протекает легче и быстрее, чем восстановление оксидов железа до FeO.

С увеличением содержания MgO в окатышах КГОК возрастает горячая прочность, так как оксид магния в составе окатышей образует тугоплавкую рудную фазу – магнезиальную шпинель. С ростом содержания монооксида железа в окатышах КГОК наблюдается снижение прочности при восстановлении. Влияние V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и MnO на восстановимость окатышей КГОК аналогично агломерату.

С повышением содержания MgO восстановимость железофлюса ВГОК снижается, так как при спекании шихты железофлюса в процессе агломерации не происходит тех фазовых превращений, которые происходят при спекании

концентрата КГОК. С повышением FeO горячая прочность железоблинка растет. Как и в случае с агломератом КГОК закисный железоблинок обладает более высокой горячей прочностью, чем окисный. Повышенное содержание Fe ухудшает прочность железоблинка при восстановлении. С повышением основности железоблинка наблюдается повышение горячей прочности. При повышении содержания MnO в железоблинке наблюдается увеличение прочности при восстановлении, так как марганец повышает высокотемпературные свойства, а также растет его восстановимость. Пентаоксид ванадия снижает восстановимость железоблинка ВГОК.

Оптимальный химический состав сырья отличается от расчетного, более высоким содержанием Fe, FeO, MnO в агломерате КГОК и железоблинке ВГОК, а также повышением их основности. Содержание MgO в агломерате стало выше на 0,22%, а в железоблинке, напротив, снизилось на 0,42%. Содержание монооксида железа в окатышах снизилось на 0,42%. Также в расчетном химическом составе сырья повышение  $V_2O_5$ .

Рекомендации для получения оптимального химического состава:

- необходимо вводить в состав агломерата КГОК доломитизированные добавки, которые повысят содержание MgO до расчетного значения,
- необходимо добавлять марганцевый концентрат при производстве железоблинка ВГОК и агломерата КГОК для повышения содержания MnO,
- необходимо повышать основность железоблинка ВГОК и агломерата КГОК путем добавления дополнительного количества CaO,
- необходимо повышать содержание FeO в железоблинке ВГОК и агломерате КГОК путем повышения расхода кокса при агломерации, при этом снижать содержание FeO в окатышах КГОК путем повышения степени окисления окатышей при обжиге.

Качество готовых чугуна и шлака при плавке сырья с оптимальным составом не ухудшится, при этом восстановимость железорудных материалов вырастет на 0,31%, а горячая прочность станет выше на 22,75%, что приведет

к снижению удельного расхода кокса, а также снизит количество мелочи в столбе шихтовых материалов в процессе восстановления.

Повышение восстановимости железорудных материалов на 0,31% приведет к снижению удельного расхода кокса на 0,46 кг/т чугуна. Экономический расчет доказывает экономическую целесообразность проекта, так как снижение удельного расхода кокса принесет увеличение прибыли на 60,52 млн. руб./год или на 0,27 % от базового уровня, условно-годовая экономия также составит 60,52 млн руб./год. Себестоимость 1 т чугуна снизится на 11,75 руб., а рентабельность продукции вырастет на 0,06%.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Вегман Е.Ф. Доменное производство: Справочное издание. Том 1. Подготовка руд и доменный процесс / Е.Ф. Вегман – М.: Metallurgy, 1989. – 496 с.
2. Лялюк В.П. Влияние содержания FeO в агломерате на его восстановимость и расход кокса в доменной плавке / В. П. Лялюк [и др.] // Бюллетень «Черная металлургия». – 2011. – № 9. – С. 25–30.
3. Корнилова Н.К. Восстановимость как характеристика качества железорудного материала и способы ее измерения / Н. К. Корнилова, Ф. М. Журавлев, А. М. Чернышов // Сталь. – 1986. – № 1. – С. 9–12.
4. Хреева С.Н., Кучин В.Ю., Деткова Т.В., Елисеев А.А. Оптимизация технологических параметров процесса спекания на основе экспериментально-статистических моделей горячей прочности и восстановимости агломерата. // Бюллетень «Черная металлургия». – 2022. – № 5. – С. 389–394.
5. Меламуд С.Г. Разработка способов получения прочных окатышей при восстановлении / С.Г. Меламуд, Б.П. Юрьев, Л.Б. Брук // Известия вузов. Черная металлургия. – 2002. – № 2. – С. 3–6.
6. Коротич В.И. Основы теории и технологии подготовки сырья к доменной плавке / В.И. Коротич – М.: Metallurgy, 1978. — 203 с.
7. Малышева Т.Я., Долицкая О.А. Петрография и минералогия железорудного сырья : учебное пособие для вузов / Т.Я. Малышева, О.А. Долицкая. — Москва : Издательский Дом МИСиС, 2004. — 422 с.
8. Фролов Ю.А. Агломерация: технология, теплотехника, управление, экология / Ю. А. Фролов. – Москва : Metallurgizdat, 2016. – 672 с.
9. Гребе К., Кеддайнис Х., Штриккер К.П. Технологические и металлургические возможности уменьшения разрушения агломерата // Черные металлы. 1984. № 20. С. 28–35.

10. Тимошпольский В.И., Трусова И.А., Плющевский И.Н., Корнеев С.В. Перспективы производства и использования металлизированного сырья для получения высококачественных марок стали. Сообщение 1. Анализ современных схем получения металлизированного сырья // *Литье и металлургия*. 2009. № 1 (50). С. 134–138.
11. Taylor P.R., Shuey S.A., Vidal E.E., Gomez J.C. Extractive metallurgy of vanadium-containing titaniferous magnetite ores : A review // *Minerals and Metallurgical*. 2006. №23. С. 80–86.
12. Лазуткин С.С. Исследование и разработка новой технологии переработки окатышей Качканарского ГОКа: дис. канд. техн. наук. — Москва, МИСиС, 2000. — 158 с.
13. Дмитриев А.Н., Золотых М.О., Витькина Г.Ю., Маршук Л.А., Ялунин М.С. Математическая модель металлизации титаномагнетитовых руд Качканарского месторождения в шахтной печи Мидрекс. // *Бюллетень «Черная металлургия»*. – 2021. №10. С. 1039–1045.
14. Lazutkin S.E., Yusfin Yu.S., Zinyagin G.A. etc. Improvement in DRI and vanadium-containing product technology for Midrex process // *Металлург*. 2001. №9. С. 39–42.
15. Дмитриев А.Н., Петухов Р.В. Подготовка к доменной плавке титаномагнетитовых концентратов с различным содержанием диоксида титана // *Бюллетень «Черная металлургия»*. 2017. №12. С. 27–29.
16. Чесноков Ю.А. Информационная система «Интерактивные расчеты в черной металлургии» // *Бюллетень «Черная металлургия»*. 2015. №12. С. 63–67.
17. Юрьев Б.П., Дудко В.А. Разработка технологий с целью повышения металлургических свойств качканарских окатышей // *Бюллетень «Черная металлургия»*. 2018. №9. С. 32–39.
18. Тимофеева А.С., Кожухов А.А. Роль оксида магния в формировании физико-химических и металлургических свойств

железородных окатышей // Бюллетень «Черная металлургия». 2018. №5. С. 23–27.

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

20. Исаенко Г.Е., Ковалев Д.А., Мещеряков Н.С., Михайлов В.Г., Ким Д.С. Исследование влияния повышения содержания железа в железородном концентрате на технологические показатели спекания и металлургические свойства агломерата // Бюллетень «Черная металлургия». 2021. №10. С. 1032–1038.

21. Кобелев В.А., Пузанов В.П., Нечкин Г.А. Температура плавления железородных агломератов // Сталь. 2015. №11. С. 10–16.

22. Берсенева, И. С. Агломерация окисленных железистых кварцитов [Текст] / И. С. Берсенева, А. Ю. Петрышев, Н. А. Майстренко и др. // Сталь. 2016. № 12. С. 2–7.

23. Берсенева И.С., Лопатин А.С., Белогуб Е.В., Чесноков Ю.А., Анисимов Н.К., Майстренко Н.А. Металлургические свойства агломератов из концентрата окисленных железистых кварцитов // Бюллетень «Черная металлургия». 2017. №3. С. 48–54.

24. Дмитриев А.Н., Витькина Г.Ю., Петухов Р.В., Петрова С.А., Чесноков Ю.А. Оценка показателей доменной плавки титаномагнетитовых концентратов с различным содержанием диоксида титана. // Бюллетень «Черная металлургия». 2019. №2 С. 154–165.

25. Дмитриев А.Н. Современное состояние, перспективы развития и освоения базы титаносодержащих руд Урала // Бюллетень «Черная металлургия». 2015. №12. С. 36–40.

26. Дмитриев А.Н., Носков В.Ю. Физико-химические и теплофизические основы переработки титаномагнетитовых руд // Металлург. 2017. №5. С. 42–45.

27. Сибгатуллин С.К., Харченко А.С., Миникаев С.Р., Игликова У.Ж., Полинов А.А., Гушин Д.Н. Исследование влияния ввода железомagneзиальной руды в агломерационную шихту на показатели доменной плавки // Бюллетень «Черная металлургия». 2020. №9. 910–919.

28. ISO 13930:2015 Росстандарт. Руды железные для шихты доменной печи. Определение показателей разрушения при восстановлении при низких температурах с помощью динамического метода. М. : Стандартиформ, 2020.

29. ISO 4696:2015 Росстандарт. Руды железные для шихты доменной печи. Статический метод определения показателей низкотемпературного восстановления-измельчения. М. : Стандартиформ, 2020.

30. Новиков Д.А. Статистические методы в педагогических исследованиях (типовые случаи) / Д.А. Новиков. – М.: МЗ-Пресс, 2004. – 67 с.

31. Шилова З.В. Теория вероятностей и математическая статистика: учебное пособие / З.В. Шилова, О.И. Шилов. – Киров: Изд-во ВГГУ, 2015. – 158 с.

32. Нечкин Г.А. Исследование влияния минерального структурообразования на металлургические свойства железорудных агломератов : диссертация кандидата технических наук : 05.16.02 / Г.А. Нечкин; [Место защиты: Ин-т металлургии УрО РАН]. – Екатеринбург, 2015. – 143 с.

33. ISO 7215:2015 Росстандарт. Руды железные для шихты доменной печи. Определение восстановимости путем оценки конечной степени показателя восстановления. М. : Стандартиформ, 2020.

34. ISO 4695:2015 Росстандарт. Руды железные для шихты доменной печи. Определение индекса восстановимости. М.: Стандартиформ, 2020.

35. ISO 7992:2015 Росстандарт. Руды железные для шихты доменной печи. Определение восстановления под нагрузкой. М. : Стандартиформ, 2020.

36. Тлеугабулов Б.С. Методика расчет состава доменной шихты и показателей доменной плавки при совместном вдувании природного газа

и угольной пыли : метод. указания к выполнению практ. и курс. работ [Текст] / Б.С. Тлеугабулов; М-во образования и науки РФ; ФГАОУ ВПО «УрФУ им.первого Президента России Б.Н.Ельцина», Нижнетагил. технолог. ин-т (фил). – Нижний Тагил: НТИ (ф) УрФУ, 2015. – 56 с.

37. Русских В.П., Семаков В.В. Анализ влияния восстановимости железорудной шихты на показатели доменной плавки // Вісник приазовського державного технічного університету. 2012. Вип. 25. С. 27–35.

38. Юрьева Л.В. Экономическое обоснование дипломных проектов по металлургическому производству [Текст] / Л.В. Юрьева. – Урал. гос. техн. ун-т – УПИ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Нижнетагил. технол. ин-т (фил.). – Нижний Тагил: НТИ (ф) УГТУ-УПИ, 2008. – 38 с.

39. Плотникова И.Ю., Климова О.В. Оформление выпускной квалификационной работы студентами вуза: требования стандарта / И.Ю. Плотникова, О.В. Климова. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2022. – 59 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

Таблица А.1 – Химический состав компонентов шихты по базовому варианту

Компонент шихты	Fe	FeO	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MgO	S	TiO <sub>2</sub>	MnO	CaO	SiO <sub>2</sub>	P	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Агломерат КГОК	55,12	11,27	0,53	2,65	0,016	2,66	0,19	10,1	4,13	0,006	2,41
Окатыш КГОК	61,00	2,87	0,61	2,32	0,002	2,84	0,21	1,10	3,68	0,004	2,5
Железофлюс ВГОК	48,82	7,89	0,73	3,32	0,052	2,13	0,61	15,47	5,35	0,046	2,55
Металлодобавка ТМ ст. 10–100	50,13	14,90	0,91	7,82	0,126	0,82	2,67	16,01	8,76	0,179	2,83
Брикет доменный	58,67	13,00	0,49	4,64	0,092	0,37	1,29	7,74	8,76	0,118	1,81
Шлак десульфурации	63,75	0,86	1,99	5,96	2,241	1,04	0,96	19,21	2,3	0,110	1,35
Кокс	0,78	0	0	0,20	0,490	0	0	0,64	5,68	0,043	2,31
ПУТ	0,54	0	0	0,18	0,390	0	0	0,68	3,29	0,061	1,76

Таблица А.2 – Химический состав смеси агломерата и окатышей и смеси металлодобавок по базовому варианту

Компонент шихты	Fe	FeO	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MgO	S	TiO <sub>2</sub>	MnO	CaO	SiO <sub>2</sub>	P	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Смесь агломерата и окатышей КГОК	58,71	6,1	0,58	2,45	0,007	2,77	0,20	4,61	3,86	0,005	2,46
Смесь металлодобавок	53,82	13,9	0,77	6,51	0,155	0,64	2,08	12,77	8,63	0,153	2,39

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(обязательное)

Таблица Б.1 – Химический состав компонентов шихты по расчетному варианту

Компонент шихты	Fe	FeO	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MgO	S	TiO <sub>2</sub>	MnO	CaO	SiO <sub>2</sub>	P	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Агломерат КГОК	55,40	12,53	0,56	2,87	0,016	2,66	0,21	10,60	4,13	0,006	2,41
Окатыш КГОК	61,00	2,45	0,64	2,32	0,002	2,84	0,23	1,10	3,68	0,004	2,5
Железофлюс ВГОК	50,22	9,10	0,76	2,90	0,052	2,13	0,70	15,98	5,35	0,046	2,55
Металлодобавка ТМ ст. 10–100	50,13	14,90	0,91	7,82	0,126	0,82	2,67	16,01	8,76	0,179	2,83
Брикет доменный	58,67	13,00	0,49	4,64	0,092	0,37	1,29	7,74	8,76	0,118	1,81
Шлак десульфурации	63,75	0,86	1,99	5,96	2,241	1,04	0,96	19,21	2,3	0,110	1,35
Кокс	0,78	0	0	0,20	0,490	0	0	0,64	5,68	0,043	2,31
ПУТ	0,54	0	0	0,18	0,390	0	0	0,68	3,29	0,061	1,76

Таблица Б.2 – Химический состав смеси агломерата и окатышей и смеси металлодобавок по расчетному варианту

Компонент шихты	Fe	FeO	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MgO	S	TiO <sub>2</sub>	MnO	CaO	SiO <sub>2</sub>	P	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Смесь агломерата и окатышей КГОК	58,82	6,4	0,61	2,53	0,007	2,77	0,22	4,77	3,86	0,005	2,46
Смесь металлодобавок	53,82	13,9	0,77	6,51	0,155	0,64	2,08	12,77	8,63	0,153	2,39