

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

На правах рукописи



**Бардавелидзе Гога Гурамович**

**НАУЧНО ОБОСНОВАННЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ  
ПРОИЗВОДСТВА ОКАТЫШЕЙ НА ОБЖИГОВЫХ МАШИНАХ ИЗ КОНЦЕНТРАТА  
ОКИСЛЕННЫХ ЖЕЛЕЗИСТЫХ КВАРЦИТОВ**

2.6.2. Metallurgy of black, colored and rare metals

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2024

Работа выполнена на кафедре «Теплофизика и информатика в металлургии» Института новых материалов и технологий ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина».

**Научный руководитель**

доктор технических наук, профессор  
**Спирин Николай Александрович**

**Официальные оппоненты:**

**Дмитриев Андрей Николаевич**,  
доктор технических наук,  
ФГБУН Институт металлургии  
Уральского отделения Российской  
академии наук, г. Екатеринбург,  
главный научный сотрудник  
лаборатории пирометаллургии  
восстановительных процессов;

**Харченко Александр Сергеевич**,  
доктор технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВО «Магнитогорский  
государственный технический  
университет им. Г. И. Носова»,  
заведующий кафедрой металлургии  
и химических технологий;

**Нечкин Георгий Александрович**,  
кандидат технических наук,  
АО «Уральский институт металлов»,  
г. Екатеринбург, исполнительный  
директор Научно-исследовательского  
центра подготовки сырья  
и руднотермических процессов

Защита диссертации состоится «15» ноября 2024 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета УрФУ 2.6.03.08 по адресу: 620002, г. Екатеринбург ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=6231>

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Шопперт Андрей Андреевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования**

Устойчивая тенденция увеличения спроса на высококачественное железорудное сырье определяет необходимость повышения его металлургических свойств, увеличения объемов производства и при этом снижения затрат. Сложность агрегатов и технологий металлургической промышленности в значительной степени затрудняет решение этих задач.

Основным технологическим агрегатом для термообработки железорудных окатышей в металлургической промышленности является обжиговая конвейерная машина.

Внедрение в производство новых видов руд и концентратов является важной задачей сохранения и развития промышленного потенциала экономики России. В условиях металлургии Российской Федерации перспективным является использование гематитовых руд, запасы которых составляют 7 млрд тонн.

В настоящее время для производства железорудных обожженных окатышей в Российской Федерации в основном применяются магнетитовые руды, и их запасы не бесконечны. Дополнительным источником железорудного сырья могут стать гематитовые руды и гематитовые концентраты, получаемые из хвостов процесса обогащения. Такие концентраты являются вторичным продуктом обогащения магнетитовых руд, и их утилизация актуальна как с позиции повышения степени извлечения железа из руд, так и с точки зрения устойчивого развития – за счет уменьшения объема отходов.

Повышение сложности извлечения и обогащения магнетитовых руд, удорожание концентрата и другие факторы создали предпосылки для вовлечения в производство окатышей концентрата из окисленных железистых кварцитов (далее по тексту – ОЖК). Техногенным месторождением сырья для этой технологии служит хвостохранилище, образованное при складировании хвостов обогащения магнетитовых руд Михайловского месторождения (Курская обл., г. Железнодорожск, АО «Михайловский ГОК им. А. В. Варичева»).

Потенциал производства гематитового концентрата из хвостов технологического процесса огромен. Помимо хвостов текущего производства (27 млн тонн в год), имеются «лежалые» хвосты. В техногенном месторождении АО «Михайловский ГОК им. А. В. Варичева» (хвостохранилище) заскладировано более чем 563 млн тонн (на 2010 г.) переработанных и готовых к дальнейшей переработке отходов обогатительного производства. Стратегия развития АО «Михайловский ГОК им. А. В. Варичева» направлена на увеличение объемов производства железорудной продукции. В связи с этим задача разработки параметров производства окатышей на АО «Михайловский ГОК им. А. В. Варичева» с использованием концентрата окисленных железистых кварцитов Михайловского месторождения является актуальной, однако решение данной задачи сдерживалось отсутствием эффективной апробированной технологии окомкования концентрата ОЖК и необходимостью совершенствования технологии производства обожженных окатышей ОЖК.

В связи с этим научно обоснованные технические и технологические решения производства окатышей на обжиговых машинах из концентрата окисленных железистых кварцитов являются актуальными.

### **Степень разработанности проблемы исследования**

Существенный вклад в развитие теории и практики подготовки железорудного сырья окомкования и термообработки окатышей внесли известные российские и советские ученые: Я. Л. Белоцерковский, В. А. Тверитин, Б. П. Юрьев, С. Г. Братчиков, Ю. С. Юсфин, В. И. Коротич, Ю. С. Жуков, Ю. Г. Ярошенко, С. В. Шаврин, С. Г. Меламуд, Ю. А. Берман, В. М. Абзалов, В. И. Лобанов, В. И. Клейн, В. А. Горбачев, С. Н. Евстюгин, Г. М. Майзель, Б. А. Боковиков, Л. И. Каплун. Из ведущих зарубежных компаний по производству железорудных окатышей следует отметить: Outotec, Metso, Primetals, Danieli, из зарубежных ученых – Ф. М. Журавлева, З. И. Некрасова, Н. Н. Бережного, К. I. Gallagher, D. Papanastassion, G. Bitsianes, A. C. D. Chaklader, D. F. Ball, F. G. Butter.

Концентрат ОЖК Михайловского месторождения – это концентрат, полученный после обогащения окисленных железистых кварцитов, образованных в результате обогащения магнетитовой руды. Вовлечение в производство окатышей из концентрата ОЖК Михайловского месторождения в практике лимитировалось разработкой уникальной технологии по производству концентрата из окисленных железистых кварцитов, но дальнейшие исследования по производству окатышей необходимого качества из данного концентрата не осуществлялись. В России и в странах СНГ отсутствует промышленный опыт производства окатышей из окисленных железистых кварцитов, в том числе с использованием твердого топлива.

### **Цель работы**

Целью данной работы является разработка научно обоснованных технических и технологических решений производства окатышей на обжиговых машинах из концентрата окисленных железистых кварцитов Михайловского месторождения.

*Объект исследования* – технологические и технические решения, параметры производства окатышей из концентрата окисленных железистых кварцитов Михайловского месторождения.

*Предмет исследования* – процессы производства сырых и обожженных окатышей ОЖК и определение параметров производства окатышей на обжиговых машинах АО «Михайловский ГОК им. А. В. Варичева».

### **Задачи исследования:**

1. Анализ состояния производства окатышей из гематитовых руд на обжиговых машинах.
2. Исследование химического состава и физических свойств шихтовых компонентов окатышей ОЖК.
3. Исследование химического состава и физических свойств сырых и сухих окатышей ОЖК.
4. Исследование свойств полупромышленных обожженных окатышей ОЖК.
5. Математическое моделирование процессов с целью выбора режимных параметров производства окатышей применительно к обжиговым машинам АО «Михайловский ГОК им. А. В. Варичева».
6. Разработка технических и технологических решений производства окатышей на обжиговых машинах из концентрата окисленных железистых кварцитов.

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

1. Впервые исследованы физико-химические свойства и минеральный состав концентрата ОЖК, получены новые данные для понимания его поведения при различных стадиях обработки.
2. Впервые исследованы физические свойства сырых, сухих обожженных окатышей из концентрата ОЖК, получены новые данные для разработки технологии их получения.
3. Обосновано использование органического полимерного связующего «Alcotac CS» для улучшения комкуемости шихты и улучшения качественных характеристик сырых и сухих окатышей из концентрата ОЖК, что способствует повышению эффективности производственного процесса.
4. Усовершенствована методика определения комплексных экспериментальных параметров обжиговой машины. Разработана новая методика определения коэффициента пересчета прочности на сжатие лабораторных обожженных окатышей из вертикального пробника на прочность промышленных окатышей, которая повышает точность и надежность оценки их механических свойств.
5. Усовершенствована математическая модель термообработки окатышей ОЖК, включающая интеграцию блока горения углерода и расчет количества теплоты при выгорании на каждом расчетном шаге модели, которая позволяет более точно прогнозировать температурно-временной режим обжига.

б. Выполнен научно обоснованный выбор технических и технологических решений производства окатышей на обжиговых машинах из концентрата окисленных железистых кварцитов, которые обеспечивают повышение эффективности процесса производства и качество готовой продукции.

#### **Практическая значимость работы**

Практическая значимость работы заключается в перспективе создания промышленного производства окатышей из концентрата ОЖК Михайловского месторождения на обжиговых машинах АО «Михайловский ГОК им. А. В. Варичева». Результаты данной работы формируют основу для разработки технологий производства окатышей из окисленных железистых кварцитов как зарубежных месторождений, так и других месторождений Российской Федерации.

Результаты диссертационной работы использованы для выполнения договорных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ ООО «НПВП ТОРЭКС» перед АО «Михайловский ГОК им. А. В. Варичева».

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

При выполнении лабораторных исследований применены стандартные методы определения химического состава, физических свойств и качественных характеристик шихтовых компонентов, сырых, сухих и обожженных окатышей, согласно ГОСТ и ISO.

Выбор режимных параметров производства окатышей ОЖК осуществлен с использованием адаптированной к условиям действующих обжиговых машин математической модели ООО «НПВП ТОРЭКС», в которой учитывается весь комплекс физико-химических, теплофизических процессов режима термообработки окатышей.

При полупромышленных испытаниях применена методика ООО «НПВП ТОРЭКС» для определения температуры в рабочем пространстве обжиговой машины, а также разработанная автором методика определения коэффициента пересчета прочности на сжатие лабораторных обожженных окатышей из вертикального пробника на прочность промышленных окатышей.

**Достоверность результатов** диссертационной работы обеспечивается проведением большого объема лабораторных исследований на современном оборудовании, использованием современных сертифицированных физико-химических методик исследования и методов анализа. Полученные результаты исследований и выводы согласованы между собой, что подтверждается как лабораторными, так и полупромышленными испытаниями.

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

1. Результаты исследования химического состава и физических свойств шихтовых компонентов для производства окатышей, материальные балансы технологических процессов, результаты исследования свойств сырых окатышей и полупромышленных обожженных окатышей ОЖК.

2. Технологические решения производства сырых окатышей из концентрата ОЖК Михайловского месторождения.

3. Технологические режимы термообработки окатышей ОЖК Михайловского месторождения на действующих обжиговых машинах АО «Михайловский ГОК им. А. В. Варичева».

#### **Личный вклад соискателя**

Научное обоснование основных положений диссертационной работы, определение цели и задач исследований, разработка методологии и непосредственное участие в лабораторных и полупромышленных экспериментах, интеграция блока горения углерода в математическую модель обжига окатышей, обобщение полученных результатов и их анализ, разработка технических и технологических решений производства окатышей на обжиговых машинах из концентрата окисленных железистых кварцитов, подготовка научных публикаций.

#### **Апробация работы**

Материалы диссертации доложены и обсуждены на следующих конференциях: XXII Международная научно-практическая конференция «Металлургия: технологии, инновации,

качество» «Металлургия-2021». Россия, г. Новокузнецк, СибГИУ, 2021 г.; XI Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве» (ТИМ'2023) с международным участием. Россия, г. Екатеринбург, УрФУ, 2023 г.; XII Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве» (ТИМ'2024) с международным участием. Россия, г. Екатеринбург, УрФУ, 2024 г.

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 10 научных работ, в том числе 8 статей в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, из них 6 статей – в журналах, индексируемых в международных базах данных Scopus, WoS.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложений, изложена на 144 с. машинописного текста и содержит 38 таблиц, 57 рисунков, список использованной литературы, содержащий 112 наименований и 4 приложения.

### **Благодарности**

Автор выражает глубокую и искреннюю благодарность сотрудникам ООО «НПВП ТОРЭКС» за помощь в проведении исследований и при оформлении диссертационной работы к защите; научному руководителю – д-ру техн. наук, проф., заведующему кафедрой «Теплофизика и информатика в металлургии» ИНМТ УрФУ Н. А. Спирину за научное руководство и неоценимую помощь в подготовке к защите диссертации; главному металлургу АО «Михайловский ГОК им. А. В. Варичева» – канд. техн. наук С. П. Пигареву за помощь в проведении исследований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** дано обоснование актуальности темы исследований, сформулированы цель и задачи работы, изложены основные защищаемые положения, научная новизна, практическое значение диссертации, приведены сведения о методах исследований, апробации работы и публикациях автора.

**В первой главе** представлен аналитический обзор технологии получения железорудных окатышей на обжиговой конвейерной машине, в том числе из гематитового концентрата за рубежом. Рассмотрено расчетное замещение углеродом снижения начального содержания FeO в окатышах. Выявлено, что оптимальная дозировка твердого топлива (коксыка) в окатыши, при начальном содержании FeO = 3–5 % в шихте, составляет 1 %, что подтверждает анализ опыта производства окатышей из гематитовых руд за рубежом. Повышенная дозировка коксыка способствует увеличению доли углерода на восстановление окисленных окатышей, образованию расплавов, затормаживающих диффузию кислорода внутрь окатыша, что, вероятно, повлечет за собой увеличение температуры окатышей в зоне охлаждения при их вторичном окислении. Также при увеличении дозировки коксыка в шихту, при его горении, образуется и увеличенное количество пор, что отрицательно влияет на прочностные характеристики окатышей. При уменьшенной дозировке коксыка в шихту присутствует вероятность отсутствия твердофазных и жидкофазных спеканий от недостаточного количества теплоты при его горении, что также отрицательно влияет на прочностные характеристики окатышей. И, соответственно, недостаточное количество коксыка способствует увеличению удельного расхода природного газа.

Рассмотрена хронология обогащения руд окисленных железистых кварцитов (ОЖК) Михайловского месторождения. Исследования в данном направлении реализовали организация ООО НИИПИ «ТОМС» и АО «Михайловский ГОК им. А. В. Варичева». В результате из руд ОЖК, в том числе путем флотационного обогащения, удалось произвести концентрат ОЖК с содержанием железа общего 66,1 %.

В результате анализа проведенных исследований выявлено, что в России отсутствует промышленный опыт производства окатышей из окисленных железистых кварцитов и гематитовых концентратов с твердым топливом и без него.

По результатам аналитического обзора сформированы задачи исследования, выполнение которых осуществлялось по укрупненному алгоритму комплексных исследований, представленному на рисунке 1.

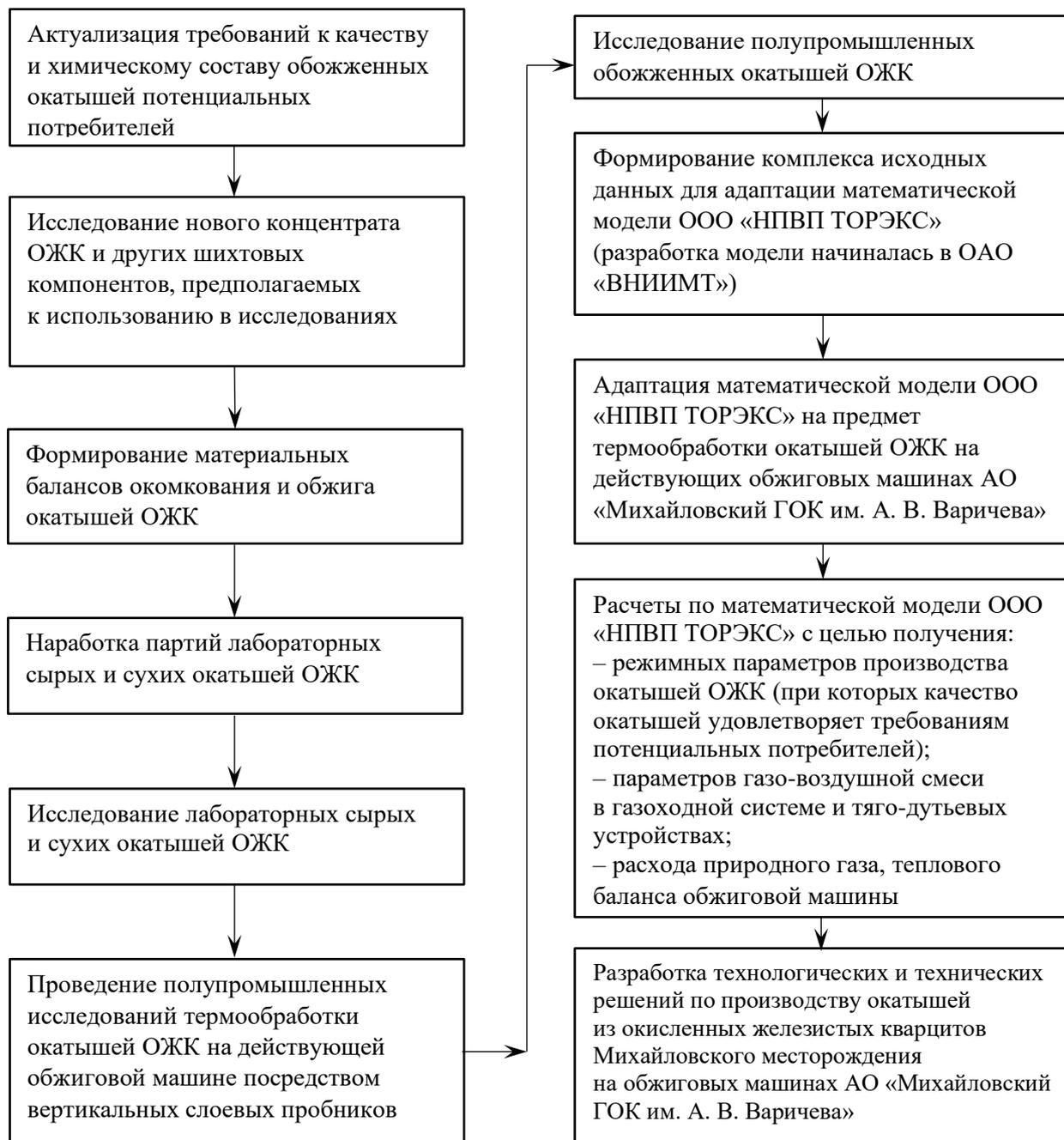


Рисунок 1 – Укрупненный алгоритм комплексных исследований

Во второй главе представлены результаты исследований химического состава и физических свойств шихтовых компонентов окатышей ОЖК и методики их определения. АО «Михайловский ГОК им. А. В. Варичева» предоставило дополнительно два вида магнетитового концентрата: «Деррики 67 % пром.» и «Деррики 70 %» – для исследований окатышей из смеси данных концентратов с концентратом ОЖК.

С целью оценки влияния частичной ликвидации гидрофобной поверхности (как результата флотационного обогащения) зерен концентрата ОЖК на качество окатышей было

принято решение доизмельчить концентрат ОЖК и дополнительно использовать его в исследованиях. Таким образом, проба концентрата ОЖК была доизмельчена с 2500 см<sup>2</sup>/г (исходная удельная поверхность концентрата ОЖК) до 2800 см<sup>2</sup>/г и также исследована. Химический состав шихтовых компонентов окатышей ОЖК представлен в таблице 1. У концентратов определялись следующие параметры: влажность, удельная поверхность, минералогический анализ, седиментационный анализ.

Физические свойства бентонита и известняка представлены в таблице 2 (в данной таблице и далее по тексту ВТУ – внутренние технические условия).

Таблица 1 – Химический состав шихтовых компонентов, используемых при наработке партий сырых окатышей

Шихтовый компонент	Содержание компонентов в шихтовых составляющих, %											
	Fe <sub>общ</sub>	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	S	C	проч.	п.п.п
Концентрат ОЖК	66,12	<b>3,98</b> (в Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> )	<b>90,05</b> (из них 8,8% в Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> )	12,8	2,1	0,1	0,22	0,71	0,035	0,38	2,3	2,88
Концентрат «Деррики 67 % пром.»	67,1	<b>27,5</b> (в Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> )	65,37 (в Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> )	<b>92,87</b>	5,94	0,03	0,17	0,14	0,01	–	0,57	0,68
Концентрат «Деррики 70 %»	70,00	<b>27,53</b> (в Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> )	69,41 (в Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> )	<b>97,02</b>	2,43	0,00	0,2	0,14	0,01	–	0,0	0,51
Бентонит	3,51	0,47	4,5	–	60,2	15,6	2,52	3,58	–	–	13,13	6,9
Известняк	0,25	0,01	0,35	–	2,42	0,6	1,01	52,4	–	–	43,21	42,6
Доломит	–	–	–	–	1,82	–	18,9	34,2	–	–	45,08	–
Коксик	–	–	–	–	–	–	–	–	0,56	84,25	15,19	85,0

Таблица 2 – Физические свойства бентонита, известняка и коксика

Компонент	Влажность, % / ВТУ	Индекс набухания, мл/2г / ВТУ	Эффективная вязкость, мПа*с / ВТУ	Набухаемость, раз / ВТУ	Содержание класса – 71 мкм, % / ВТУ	Содержание монтмориллонита (мма), % / ВТУ
Бентонит	6 / ≥ 5	29 / ≥ 27	61 / ≥ 30	18 / ≥ 12	92 / ≥ 88	68 / ≥ 54
Коксик	0,01	–	–	–	91 / ≥ 88	–
Известняк	0,21				93,5 / ≥ 88	

В результате анализа результатов исследований сформированы следующие выводы:

1. Анализ химического состава концентрата ОЖК характеризует его как гематитовый концентрат; концентраты «Деррики 67 % пром.» и «Деррики 70 %» – магнетитовые.

2. Необходимо отметить высокое содержание п. п. п (потери при прокаливании) в концентрате ОЖК – 2,88 %, относительно магнетитовых концентратов – 0,51 %, 0,68 %. Относительно высокое содержание п. п. п объясняется в том числе содержанием гетита в концентрате (16 %). Данный факт будет влиять на содержание железа общего в обожженных окатышах и на выход обожженных окатышей из сырых.

3. Целесообразно отметить относительно высокую основность концентрата ОЖК: CaO/SiO<sub>2</sub> = 0,34 (далее по тексту В2 = CaO/SiO<sub>2</sub>, В3 = (CaO+MgO)/SiO<sub>2</sub>). Повышенная основность концентрата ОЖК оказывает положительное влияние на производство обожженных офлюсованных окатышей за счет добавления меньшего количества известняка в шихту для поддержания необходимой основности и, как следствие, уменьшения степени разубоживания обожженных окатышей по содержанию железа Fe<sub>общ</sub>.

4. Концентрат ОЖК целесообразно характеризовать как «тонкоизмельченный» (удельная поверхность – 2500 см<sup>2</sup>/г). В доизмельченном концентрате ОЖК содержание класса

45 мкм составляет 96,26 %, что на 2,41 % выше, чем у концентрата ОЖК исходного. Данный факт объясняется доизмельчением концентрата ОЖК с удельной поверхности 2500 см<sup>2</sup>/г до 2800 см<sup>2</sup>/г. Минералогия и химический состав доизмельченного концентрата ОЖК идентичны концентрату ОЖК, так как после доизмельчения не осуществлялось дальнейшее обогащение.

5. Используемые в лабораторных испытаниях бентонит и известняк удовлетворяют критериями качества относительно внутренних технических условий (ВТУ).

6. Исследован минеральный состав используемых концентратов. Концентрат ОЖК на 73 % состоит из гематита и 16 % – из гетита, количество магнетита не превышает 13 %. Среди редких минералов в концентрате обнаружен пирит. Нерудными минералами в концентрате являются кварц, слюда, хлорит, также присутствует кальцит, их суммарное количество составляет 4 %. Все зерна преимущественно свободные, взаимные сростки магнетита и гематита редки.

7. Содержание в концентрате ОЖК частиц размером менее 45 микрон составляет 93,85 %, что соответствует аналогичному показателю у рядового магнетитового концентрата АО «Михайловский ГОК им. А. В. Варичева» – 45 мкм > 90 %.

Полученные данные химического состава и влажности использованы как исходные данные для расчета материальных балансов окомкования и обжига окатышей ОЖК.

**В третьей главе** представлены материальные балансы окомкования и обжига, шихтовые составы и физические свойства сырых и сухих окатышей ОЖК, а также методики расчетов химического состава сырых и сухих окатышей ОЖК и определение их физических свойств. Полученные результаты позволили оценить принципиальную возможность получения сырых окатышей из концентрата ОЖК Михайловского месторождения.

Расчет материальных балансов окомкования и обжига проведен с целью определения расходов компонентов шихты на основании требований потенциальных потребителей к составу 11-ти видов обожженных окатышей. В таблице 3 представлены виды окатышей и их химический состав, определенный по материальному балансу.

В связи с высокой удельной поверхностью концентрата ОЖК –  $\approx 2500$  см<sup>2</sup>/г и использованием в исследованиях коксика (является гидрофобным) было принято решение применить органическое полимерное связующее «Alcotac CS» (имеющееся у лаборатории фабрики окомкования АО «Михайловский ГОК им. А. В. Варичева») с целью улучшения комкуемости шихты и повышения качественных показателей сырых и сухих окатышей и дозировать его в шихту 1,5 г на 10 кг шихты. Использование полимерного связующего и выбор дозировки обусловлены обобщением и анализом результатов исследований отечественных и зарубежных специалистов. Для уточнения влияния полимера на качество сырых и сухих окатышей была выполнена наработка партий окатышей без полимерного связующего.

Качественные показатели сырых и сухих окатышей ОЖК с применением полимерного связующего и без него представлены в таблице 4.

Анализ результатов таблицы 4 позволяет заключить: прочность на сжатие сырых окатышей, полученных без полимера, составила в среднем 1,24 кг/ок, а с добавлением полимера – 1,7 кг/ок. Окатыши, полученные без добавления полимерного связующего, обладают невысокой прочностью на сбрасывание, в среднем: на металл – 1,4 раз, на резину – 3,3 раз. Полимерное связующее «Alcotac CS», в том числе взаимодействуя с бентонитом, усиливает его взаимодействие с концентратом и другими шихтовыми компонентами. Таким образом, с добавлением полимера влажность получаемых окатышей увеличилась с 8,9 % до 9,6 %. Полученный факт объясняется тем, что полимер увеличил способность окатыша насыщаться влагой. Как следствие, с увеличением влажности окатыша увеличивается и пластичность (прочность на сбрасывание). При частичном взаимодействии полимера с бентонитом прочность сухих окатышей увеличилась с 3,3 кг/ок до 4,8 кг/ок. В окатышах с полимером увеличивается пористость сухих окатышей при одновременном повышении их прочности, что положительно сказывается на диффузии кислорода внутрь окатыша при термообработке, т. е. справедливо предположить, что полимер создает более прочный «скелет» в окатышах, который обеспечивает большую прочность при более высокой пористости.

Таблица 3 – Представленные к исследованию виды окатышей

№	Концентрат	Основность и требование	Примечание	Химический состав обожженных окатышей по материальному балансу, %						
				Fe <sub>общ</sub>	FeO	CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	S
1	ОЖК	≈ 1,29 (по В2), MgO ≈ 1,61 %	Доменные окатыши для АО «Уральская сталь»	64,56	0,4	3,2	2,49	1,61	0,19	0,007
2	ОЖК	≈ 1,1 (по В2), MgO ≈ 1,08 %	Доменные окатыши для АО «Уральская сталь»	65,25	0,40	2,77	2,51	1,08	0,20	0,007
3	ОЖК	≈ 1,1 (по В2), MgO ≈ 0,27 %	Доменные окатыши для АО «Уральская сталь»	65,73	0,10	2,82	2,57	0,27	0,12	0,007
4	ОЖК	≈ 0,392 (по В3), SiO <sub>2</sub> ≈ 2,51 %	Окатыши на экспорт для Европы	67,31	0,4	0,75	2,51	0,25	0,2	0,007
5	ОЖК	≈ 1,0 (по В3), SiO <sub>2</sub> ≈ 2,55 %	Высокоосновные на экспорт	66,2	0,40	2,29	2,55	0,26	0,21	0,007
6	ОЖК	≈ 0,5 (по В3), SiO <sub>2</sub> ≈ 2,52 %	Окатыши для металлизации	67,11	0,40	1,02	2,52	0,24	0,2	0,007
7	ОЖК	≈ 0,39 (по В3 "DR-grade")	Окатыши для металлизации	67,28	0,10	0,74	2,52	0,24	0,10	0,007
8	ОЖК + Деррики Fe – 70 %	≈ 0,25 (по В3)	Неофлюсованные на экспорт	67,56	0,60	0,44	2,62	0,22	0,05	0,005
9	ОЖК + Деррики Fe – 67 % промышл.	≈ 0,15 (по В3)	Неофлюсованные на экспорт	66,26	0,60	0,44	4,37	0,21	0,06	0,005
10	ОЖК + Деррики Fe – 70 %	≈ 1,0 (по В3)	Высокоосновные на экспорт	66,1	0,38	2,41	2,67	0,26	0,07	0,004
11	ОЖК + Деррики Fe – 67 % промышл.	≈ 1,0 (по В3)	Высокоосновные на экспорт	63,5	0,37	4,11	4,38	0,27	0,1	0,004

Таблица 4 – Качественные показатели сырых и сухих окатышей ОЖК с применением полимерного связующего и без него

Кон-центрат	Дозировка полимерного связующего Alcotac CS, г/10 кг шихты	Физические свойства сырых окатышей					Физические свойства сухих окатышей		
		Влажность W, %	Прочность на сжатие $P_{сыр}$ , кг/ок	Прочность на сбрасывание, раз/ок			Температура шока, °С	Прочность на сжатие $P_{сух}$ , кг/ок	Пористость, %
				На металл (500 мм)	На резину (500 мм)	Среднее значение			
ОЖК	0	8,9	1,24	1,4	3,3	2,4	668,7	3,3	29,5
ОЖК	1,5	9,6	1,7	1,9	4,4	3,2	696,4	4,8	34,2
ОЖК доизм.	1,5	9,6	1,25	1,6	3,6	2,6	627	2,5	34,4

При этом за счет более высокой прочности сухих окатышей при добавлении полимера повышается температура шока окатышей, что дает предпосылки для интенсификации температурного режима в зонах сушки прососом и зоне нагрева.

У всех проб сырых и сухих окатышей, полученных с использованием полимерного связующего, выявлены удовлетворительные качественные показатели относительно внутренних технических условий фабрики окомкования АО «Михайловский ГОК им. А. В. Варичева».

В результате исследований сформированы следующие выводы:

1. Проведенный анализ материальных балансов позволил рассчитать дозировки шихтовых компонентов в зависимости от требований потенциальных заказчиков к химическому составу обожженных окатышей.

2. Расчет каждого материального баланса окомкования и обжига позволил рассчитать выход обожженных окатышей из сырых, что дает возможность прогнозировать нагрузки на окомкователи и обжиговую машину.

3. Проведенные исследования материальных балансов окомкования и обжига окатышей ОЖК позволили обнаружить повышенное содержание  $Fe_{общ}$  в обожженных окатышах, относительно сырых, что объясняется высоким содержанием в составе концентрата ОЖК показателя п. п. п. и отсутствием насыщения окатышей кислородом, так как отсутствует окисление магнетита.

4. Оптимальная дозировка коксика в шихту при содержании FeO в шихте  $\approx 5\%$  составляет  $1\%$ . Добавление коксика осуществлялось на этапе перемешивания шихты.

5. Использование полимерного связующего позволило повысить качественные характеристики сырых и сухих окатышей.

6. Доизмельчение концентрата ОЖК нецелесообразно в связи с его относительно высокой удельной поверхностью ( $\approx 2500 \text{ см}^2/\text{г}$ ). При этом дальнейшее доизмельчение приводит к ухудшению качественных показателей сырых, сухих окатышей (см. таблицу 4) и затрудняет наработку партий сырых окатышей, так как тонкоизмельченные зерна концентрата ОЖК (удельная поверхность  $\approx 2800 \text{ см}^2/\text{г}$ ) способствуют образованию новых зародышей вместо роста уже образовавшихся при окомковании.

Результаты исследований использованы как исходные данные в математической модели обжига окатышей на конвейерной машине для дальнейших расчетов технологических параметров производства окатышей ОЖК. Также полученные данные позволили оценить принципиальную возможность получения сырых окатышей из концентрата ОЖК Михайловского месторождения.

Для расчетов тепло-массообмена в слое окатышей ОЖК были произведены расчеты по математической модели процесса окислительного обжига окатышей на конвейерной машине. Разработка данной модели начиналась сотрудниками ОАО «ВНИИМТ», которые затем продолжили свою деятельность по совершенствованию и развитию модели в ООО «НПВП

ТОРЭКС». Данная модель (далее по тексту – математическая модель ООО «НПВП ТОРЭКС») универсальна и учитывает различные тепловые схемы обжиговых машин, виды железорудного сырья и шихтовых добавок, виды используемого топлива. Модель позволяет решать слоевую задачу, задачи, направленные на оптимизацию конструкции и режимов работы при разработке новых обжиговых машин, при реконструкции действующих и при использовании нового сырья. Основное отличие данной модели от ранее предлагаемых и используемых, где рассматривалась только слоевая задача и (или) отдельные технологические зоны машины, заключается в том, что здесь рассмотрена не только более последовательно слоевая задача, но и машина в целом с учетом связи различных ее зон через рециркуляцию газо-воздушных потоков и утилизацию тепла из зон охлаждения с выходом на распределение расхода топлива по длине машины.

Разработчиками математической модели предусмотрен блок горения углерода для вариантов использования твердого топлива, но данный блок ранее не использовался, так как расчеты проводились применительно к магнетитовому концентрату. Для решения задач исследования автором выполнена интеграция блока горения углерода в расчеты на математической модели. Блок горения углерода позволяет рассчитать и учесть в тепломассообмене количество теплоты, выделяемое при горении коксика в окатышах по высоте слоя и длине обжиговой машины с целью компенсации отсутствия теплоты от окисления магнетита.

**В четвертой главе** представлены результаты исследований полупромышленных обожженных окатышей ОЖК, технические и технологические решения по их производству. Целью данных исследований было выявление максимально возможной производительности обжиговой машины (ОМ), при которой качество обожженных окатышей будет удовлетворять требованиям потенциальных потребителей.

Наработанные в лабораторных условиях партии сырых окатышей ОЖК подвергались термообработке в вертикальных слоевых пробниках (рисунок 2) на действующей обжиговой машине № 2 (ОМ № 2) ФОК АО «Михайловский ГОК им. А. В. Варичева» при различных производительностях обжиговой машины.

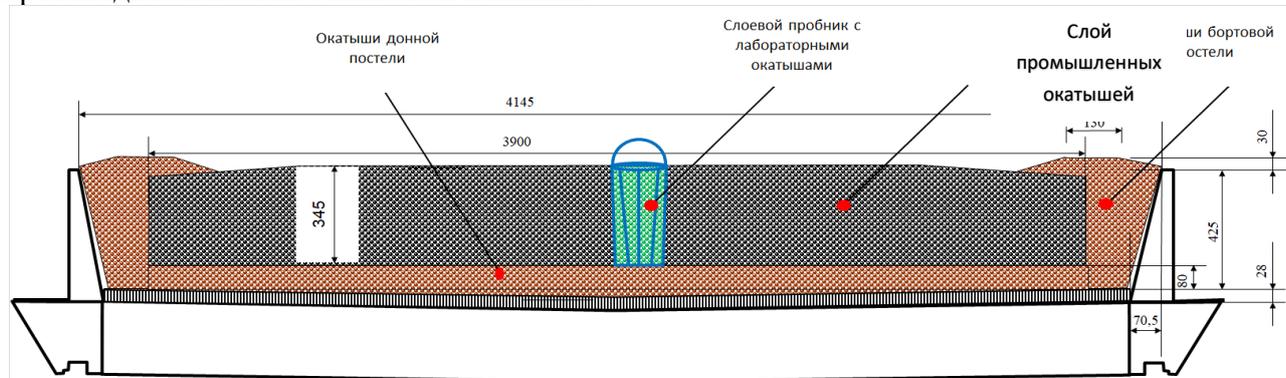


Рисунок 2 – Схема установки слоевого вертикального пробника с лабораторными окатышами на обжиговую тележку

При повышении производительности уменьшается время пребывания слоя окатышей в технологических зонах, следовательно, имеет место наличие дефицита завершенности физико-химических реакций, что влечет за собой ухудшение качества окатышей. На этом основании сформирована последовательность осуществления полупромышленных исследований.

Во время термообработки фиксировались показания КИП и осуществлялся инструментальный замер температурного режима обжига посредством термолоттера (рисунок 3). У каждой пробы обожженных окатышей определялись прочность на сжатие, пористость и химический состав ( $Fe_{общ}$ ,  $FeO$ ,  $CaO$ ,  $SiO_2$ ,  $MgO$ ,  $Al_2O_3$  и т. д.). Результаты полупромышленных исследований: качественные показатели и химический состав обожженных окатышей, режимы термообработки, показания КИП, в том числе формируют исходные данные для адаптации математической модели с целью дальнейшего моделирования технологических режимов термообработки окатышей ОЖК на обжиговых машинах ФОК АО «Михайловский ГОК им. А. В. Варичева».

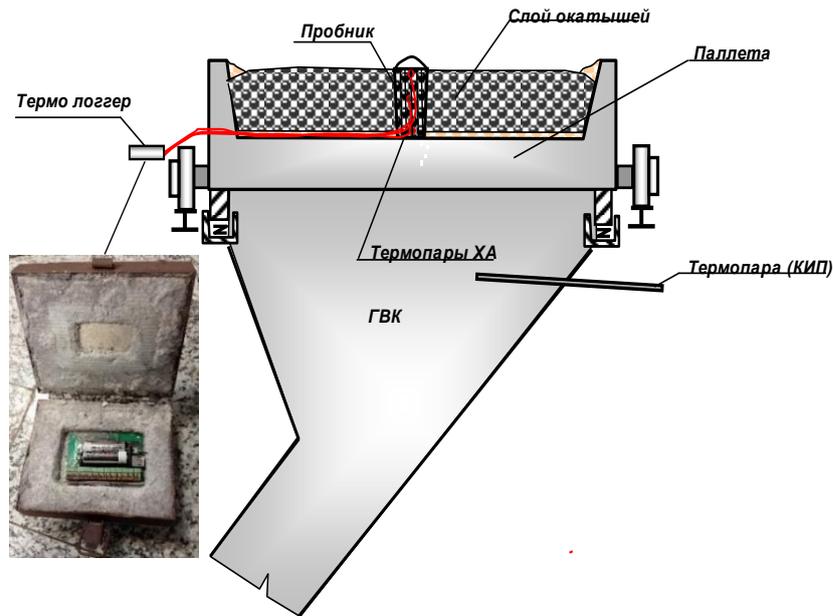


Рисунок 3 – Установка термопар и термологгера

На рисунках 4 и 5 представлены два температурных режима обжига окатышей в вертикальных пробниках 450 т/ч и 618 т/ч.

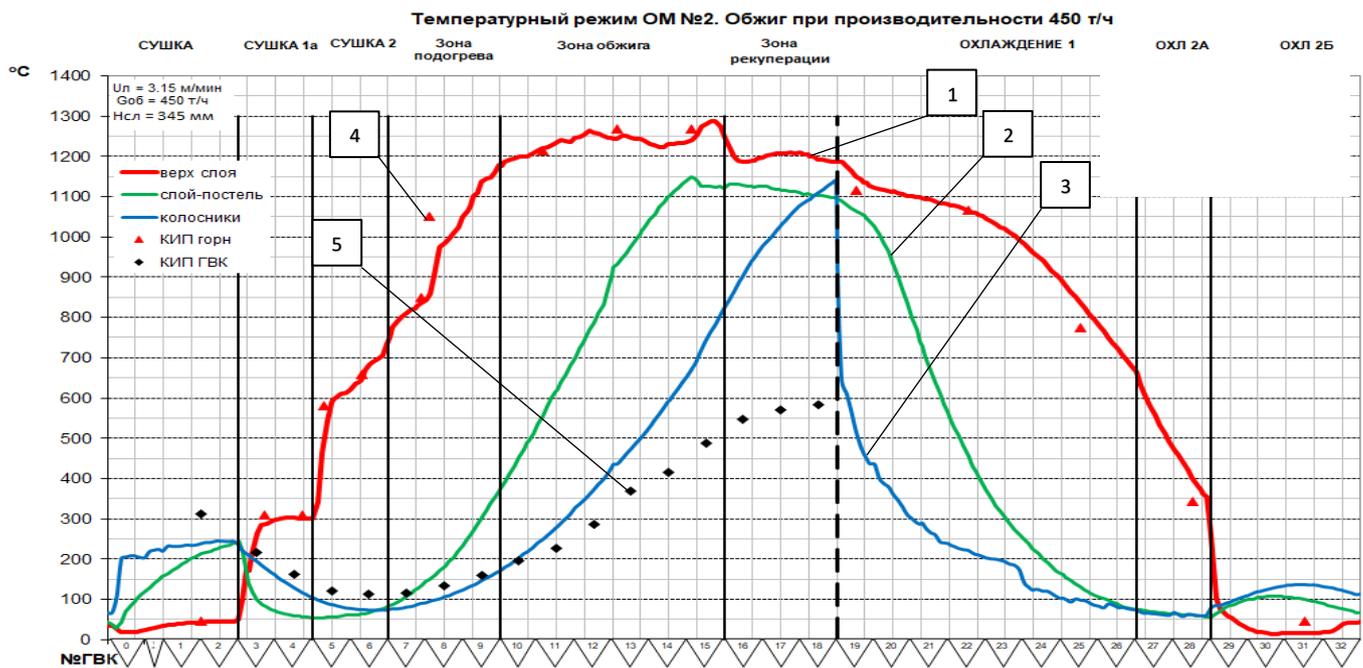


Рисунок 4 – Температурный режим обжига окатышей ОЖК на ОМ № 2 при полупромышленных исследованиях на производительности 450 т/ч:

- 1 – температура верха слоя окатышей, измеренная инструментально;
- 2 – температура на границе «слой окатышей – донная постель», измеренная инструментально;
- 3 – температура на колосниках обжиговой тележки, измеренная инструментально;
- 4 – температура в рабочем пространстве обжиговой машины (ОМ) по показаниям контрольно-измерительных приборов (КИП);
- 5 – температура в газо-воздушных камерах (ГВК) обжиговой машины (ОМ) по показаниям контрольно-измерительных приборов (КИП)

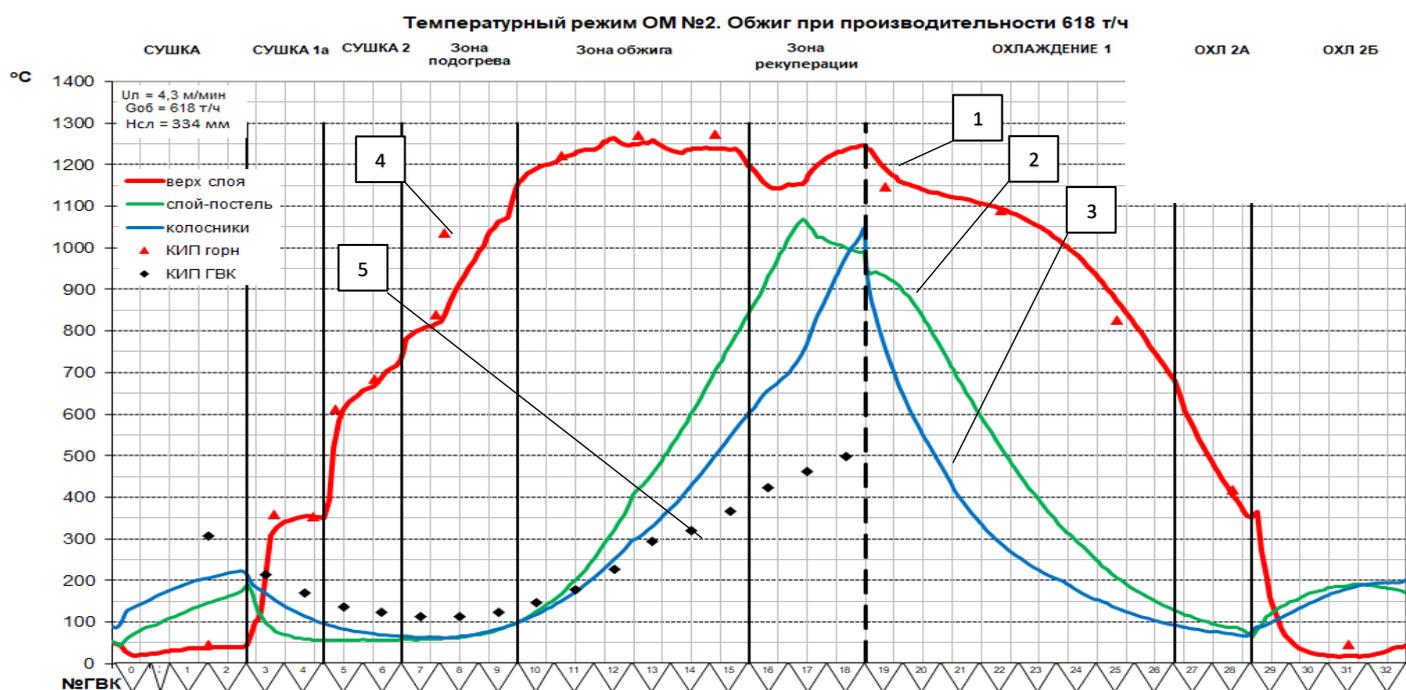


Рисунок 5 – Температурный режим обжига окатышей ОЖК на ОМ № 2 при полупромышленных исследованиях на производительности 618 т/ч (обозначения как на рисунке 4)

При проведении полупромышленных исследований необходимо учитывать тот факт, что окатыши, находящиеся в вертикальном пробнике, подвергаются воздействию «пристеночного» эффекта во время конвективного теплообмена в слое окатышей, что способствует повышению их прочности относительно прочности окатышей в слое на обжиговой тележке. Также необходимо учитывать отсутствие в пробнике окатышей постели и разницу в наработке партий лабораторных окатышей с окатышами промышленного производства. Таким образом, для достоверности определения показателя прочности на сжатие обожженных окатышей была разработана методика экспериментальных исследований с целью расчета коэффициента пересчета прочности на сжатие лабораторных окатышей из вертикальных пробников на прочность в условиях производства окатышей на обжиговой машине № 2 ФОК АО «Михайловский ГОК им. А. В. Варичева». Для расчета данного коэффициента был обработан большой массив статистических данных – результатов лабораторных и полупромышленных испытаний – и проведены дополнительные лабораторные и полупромышленные исследования на обжиговой машине № 2 при производстве рядовых обожженных окатышей в том числе. При обработке статистических данных были рассчитаны средние показатели.

*Методика расчета коэффициента перевода показателя прочности на сжатие обожженных окатышей с пробника на обжиговую машину*

*Расчет коэффициента «постели»*

Данный расчет необходим для определения доли окатышей постели на обжиговой тележке и определения отношения общей прочности и прочности окатышей слоя, загруженного на обжиговую тележку. Для расчетов были отобраны пробы обожженных окатышей в зоне охлаждения обжиговой машины (ОМ) № 2 в следующих точках: верх; середина; низ; донная постель; бортовая постель слева; бортовая постель справа. У всех отобранных проб окатышей определялась прочность на сжатие.

На рисунке 6 изображена схема профиля обжиговой тележки с сырыми окатышами и окатышами постели с размерами.

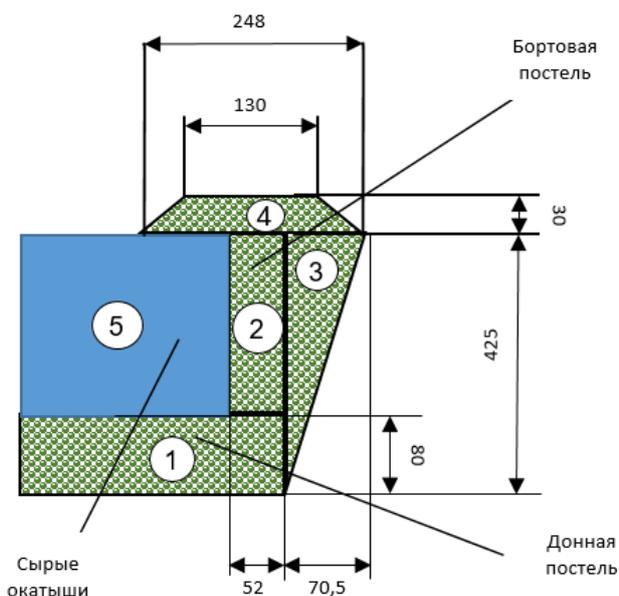


Рисунок 6 – Схема профиля обжиговой тележки с сырыми окатышами и окатышами постели (размеры представлены в мм)

Доли окатышей донной и бортовой постели были определены по площадям геометрических размеров фигур. Путем расчета площадей данных фигур определялись доли окатышей бортовой и донной постели от общего количества окатышей на обжиговой тележке. Прочность окатышей на выходе из обжиговой машины ( $d$ ), рассчитывается по формуле, кг/ок:

$$d = ((1 - x - y) * a) + (b * x) + (c * y), \quad (1)$$

где:  $x$  – доля окатышей донной постели = 0,18378;  $y$  – доля окатышей бортовой постели = 0,0443;  $a$  – средняя прочность окатышей по горизонтам слоя = 260 (кг/ок);  $b$  – средняя прочность окатышей донной постели = 220 (кг/ок);  $c$  – средняя прочность окатышей бортовой постели = 235 (кг/ок). Таким образом,  $d = 251,54$  (кг/ок). Далее рассчитываем коэффициент «постели»:  $k_{\text{пост}} = d/a = 251,54/260 = 0,9675$ .

#### Расчет коэффициента «пристеночного» эффекта пробника

Расчет необходим для выявления воздействия на прочность окатышей, которые непосредственно находятся внутри вертикального слоевого пробника. В пробник загружались окатыши с роликового питателя и обжигались на ОМ. У данного пробника определяли прочности окатышей по горизонту слоя и усредненное по многочисленным данным значение прочности составило:  $z = 280$  (кг/ок). Затем был рассчитан коэффициент «пристеночного эффекта» от пробника при термообработке  $k_{\text{п.э.}} = a/z = 260/280 = 0,9286$ .

#### Расчет коэффициента «лабораторный пробник – пробник окатышей с роликового питателя»

Расчет необходим для выявления различий между пробами окатышей, полученных в лабораторных условиях и на производстве. В лабораторных условиях были наработаны партии окатышей, аналогичные рецептуре действующего производства, затем данные окатыши загружались в пробник; параллельно во второй пробник загружались окатыши с роликового питателя и одновременно два пробника устанавливались на ОМ. В результате получали среднюю по горизонтам слоя прочность проб лабораторных окатышей и усредненное по многочисленным данным значение прочности составило:  $f = 305$  (кг/ок). Далее был рассчитан коэффициент «лабораторный пробник – пробник окатышей с роликового питателя»:  $k_{\text{лаб.пр.}} = z/f = 280/305 = 0,9180$ .

Таким образом, в дальнейшем, имея прочность лабораторных окатышей из пробника, можно вычислить среднюю предполагаемую прочность окатышей на выходе из ОМ, представляя, что ОМ производит окатыши, рецептура которых была в лабораторных окатышах.  $G$  – расчетная прочность окатышей на выходе из ОМ, рассчитывается по формуле (2), кг/ок:

$$G = f * k_{\text{лаб.пр.}} * k_{\text{п.э.}} * k_{\text{пост.}} \quad (2)$$

В итоге коэффициент пересчета прочности окатышей «с лабораторного пробника на обжиговую машину» рассчитывается по формуле (3):

$$K_{\text{лаб.пробник - ОМ}} = k_{\text{лаб.пр.}} * k_{\text{п.э.}} * k_{\text{пост.}} \quad (3)$$

Подставляя числовые значения, получим:

$$K_{\text{лаб.пробник - ОМ}} = 0,9180 * 0,9286 * 0,9675 = 0,82.$$

Для предоставления исходных данных в математическую модель достаточно использовать формулу (4), так как в математической модели окатыши постели учитываются:

$$H = f * k_{\text{лаб.пр.}} * k_{\text{п.э.}}, \text{ кг/ок}, \quad (4)$$

где  $H$  – расчетная прочность окатышей для расчета на математической модели, кг/ок;

$f$  – средняя по горизонтам слоя прочность проб лабораторных окатышей из вертикального пробника, кг/ок.

Коэффициент пересчета прочности окатышей «с лабораторного пробника на обжиговую машину для математической модели», используемый для математической модели, рассчитывается по формуле (5):

$$K_{\text{мат.мод.}} = k_{\text{лаб.пр.}} * k_{\text{п.э.}} \quad (5)$$

Подставляя числовые значения, получим:

$$K_{\text{мат.мод.}} = 0,9180 * 0,9286 = 0,85.$$

Этот коэффициент использовался в дальнейшем для поправки показателя прочности лабораторных окатышей из вертикальных пробников на промышленные условия для дальнейших расчетов на математической модели.

С учетом анализа проведенных полупромышленных исследований и наличия актуальности перспективы производства к дальнейшей адаптации математической модели определены типы окатышей, представленные в таблице 5.

Таблица 5 – Типы окатышей ОЖК для перспективы внедрения в промышленное производство на АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева» и представленные для расчетов на математической модели

№	Концентрат	Основность и требование	Примечание	Производительность ОМ № 2 при термообработке, т/ч	Прочность в пробнике с учетом коэффициента 0,85, кг/ок	Минимальная требуемая прочность, кг/ок	Основность, расчет по анализу	
							В2 расч.	В3 расч.
1	ОЖК	≈ 1,1 (по В2), MgO ≈ 0,27 %	Доменные окатыши для АО «Уральская сталь»	570	226	225	1,2	-
2	ОЖК	≈ 0,392 (по В3), SiO <sub>2</sub> ≈ 2,51 %	Окатыши на экспорт для Европы	618	260	250	-	0,36
3	ОЖК + Деррики Fe – 70 %	≈ 0,25 (по В3)	Неофлюсованные на экспорт	550	253	250	-	0,24
4	ОЖК + Деррики Fe – 67 % промышл.	≈ 0,15 (по В3)	Неофлюсованные на экспорт	520	250	250	-	0,15
5	ОЖК	≈ 1,0 (по В3), SiO <sub>2</sub> ≈ 2,55 %	Высокоосновные на экспорт	450	309	280	-	1,0
6	ОЖК	≈ 1,0 (по В3), SiO <sub>2</sub> ≈ 2,55 %	Высокоосновные на экспорт	500	266	250	-	1,0
7	ОЖК	≈ 0,39 (по В3 "DR-grade")	Окатыши для металлизации	570	299	280	-	0,31

В математической модели процесс горения углерода из окатышей характеризуется как расчет доли выгоревшего углерода на расчетном участке по эмпирической формуле (6), ранее

обоснованной специалистами ООО «НПВП ТОРЭКС», учитывающей физический смысл горения частиц коксика в окатыше и в расчетном слое в целом:

$$K_c = k * C_{O_2} * (1 - C_c)^n * \exp(-E_c / (R * T)) * \Delta\tau. \quad (6)$$

Здесь  $C_{O_2}$  – концентрация кислорода в газовой фазе у реакционной поверхности на момент расчетного шага, доля;

$C_c$  – доля выгоревшего углерода на момент расчетного шага, доля;

$T$  – температура окатышей на момент расчетного шага, К;

$E_c$  – энергия активации реакции горения (эмпирическое значение), Дж/моль;

$k$  – предэкспоненциальный множитель (эмпирическое значение), 1/с;

$R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль \* К);

$n$  – эмпирический показатель степени, характеризующий геометрию окатыша и горение углерода с периферии к центру с уменьшением объема и площади поверхности;

$\Delta\tau$  – время расчетного шага, с.

Расчетный шаг в математической модели 0,05 (м) по длине обжиговой машины и 0,005 (м) по высоте слоя окатышей. Время расчетного шага рассчитывается через скорость обжиговой машины. Так, если скорость обжиговой машины 4,375 (м/мин), то время расчетного шага будет  $0,05 / (4,375 / 60) = 0,6856$  (с). Показатель  $C_c$  принимается как сумма значения  $C_c$  и показателя  $K_c$  за предыдущий расчетный шаг по длине обжиговой машины ( $C_{c(i+1)} = C_{c(i)} + K_{c(i)}$ ), таким образом осуществляется расчет по горизонтам слоя с расчетным шагом по высоте слоя окатышей. Расчет горения углерода по расчетным шагам прекращается при достижении доли сгоревшего углерода значения 1 (единица).

Для примера рассмотрим расчет доли выгоревшего углерода на 54-м метре обжиговой машины и на горизонте слоя 308 мм. При этом имеем следующие числовые значения:

$$k = 5278 \text{ (1/с)}, C_{O_2} = 0,1151 \text{ (доли)}, C_c = 0,1317 \text{ (доли)}, n = 0,6667, E_c = 108082 \text{ (Дж/моль)}, T = 1159 \text{ К}, R = 8,314 \text{ (Дж/(моль * К))}, \Delta\tau = 0,6856 \text{ (с)}.$$

Далее, подставляя числовые значения в формулу (6), получим долю выгоревшего углерода:  $K_c = 5278 * 0,1151 * (1 - 0,1317)^{0,6667} * \exp(-108082 / (8,314 * 1159)) * 0,6856 = 0,005097$ .

Скорость реакции горения углерода на данном расчетном шаге равна  $K_c / \Delta\tau$ . По полученным данным можно вычислить удельную тепловую мощность горения углерода в расчетной точке в единицах измерения МДж/(м<sup>3</sup> слоя \* с) по формуле (7):

$$P_c = (K_c / \Delta\tau) * q_{\text{реак}} * \rho_c, \quad (7)$$

где  $q_{\text{реак}}$  – тепловой эффект реакции горения углерода, МДж/кг С;

$K_c / \Delta\tau$  – скорость реакции горения углерода, 1/с;

$\rho_c$  – объемное содержание углерода в слое, кг С/м<sup>3</sup> слоя ок.

Тепловой эффект реакции горения углерода:  $C + O_2 \rightarrow CO_2 + 31,4$  (МДж/кг С).

Объемное содержание углерода в слое  $\rho_c$  вычислим следующим образом по формуле (8):

$$\rho_c = \rho_{\text{нас ок}} * C_{\text{коксик}} * A_K / 10000, \quad (8)$$

где  $\rho_{\text{нас ок}}$  – насыпная масса окатышей = 2000 (кг/м<sup>3</sup>);

$C_{\text{коксик}}$  – содержание углерода в коксике = 84,25%;

$A_K$  – дозировка коксика в окатыши = 1%.

Тогда формула (7) примет вид:

$$P_c = (K_c / \Delta\tau) * q_{\text{реак}} * \rho_{\text{нас ок}} * C_{\text{коксик}} * A_K / 10000. \quad (9)$$

Далее, подставляя числовые значения в формулу (9), получим:

$$P_c = (0,005097 / 0,6856) * 31,4 * 2000 * 84,25 * 1 / 10000 = 3,94 \text{ (МДж/(м}^3 \text{ слоя * с))}.$$

Рассчитаем  $\Delta q_c$  – количество тепла выделяемого при выгорании углерода в слое на расчетной площади в расчетное время на единицу ширины обжиговой машины по формуле (10):

$$\Delta q_c = P_c * S_p * \Delta\tau, \quad (10)$$

где  $P_c$  – удельная тепловая мощность горения углерода в расчетной точке, МДж/(м<sup>3</sup> слоя \* с);

$\Delta\tau$  – время расчетного шага, с;

$S_p$  – расчетная площадь =  $0,005 * 0,05 = 0,00025$  м<sup>2</sup>.

Подставляя числовые значения в формулу (10), получим:

$$\Delta q_c = 3,94 * 0,00025 * 0,6856 = 0,000675 \text{ (МДж/ед. ширины ОМ)}.$$

При расчете горения углерода на каждом расчетном шаге выделяется количество теплоты (часть которой расходуется на нагрев газа, а часть – на нагрев материала), которое участвует в расчетах тепло-массообмена внутри слоя и позволяет рассчитывать температуры на выходе из слоя окатышей за каждый расчетный шаг по длине обжиговой машины, как показано на блок-схеме алгоритма расчета математической модели рисунка 7.

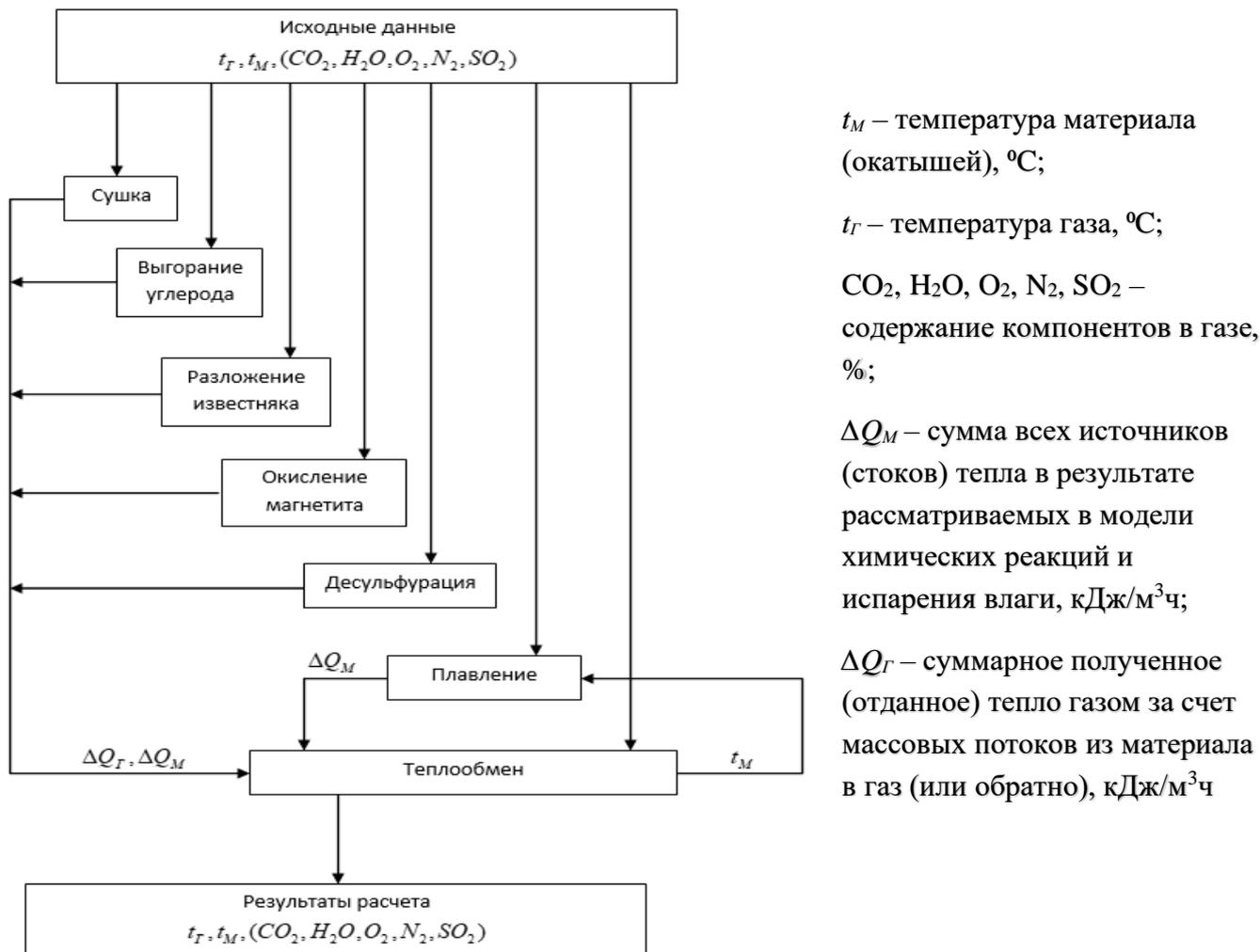


Рисунок 7 – Блок-схема алгоритма расчета тепломассообмена (на одном расчетном шаге) в математической модели ООО «НПВП Торэкс»

После адаптации математической модели осуществлен расчет параметров производства окатышей ОЖК на обжиговых машинах при максимально возможных производительностях, при которых качество окатышей ОЖК будет удовлетворять потенциальным заказчикам. Расчеты осуществлены для обжиговых машин ОМ № 1, № 2 и ОМ № 3, при этом необходимо отметить, что обжиговые машины № 1 и № 2 практически идентичны.

Фрагменты результатов расчетов представлены в таблице 6. В качестве примера на рисунках 8 и 9 представлены результаты расчета математической модели термообработки окатышей ОЖК на ОМ № 3 «Доменные окатыши для АО “Уральская сталь”» (проба № 1 таблицы 6) в виде температуры окатышей по высоте слоя вдоль обжиговой машины и тепловой схемы ОМ № 3 соответственно.

Таблица 6 – Рассчитанные на математической модели ООО «НПВП ТОРЭКС» параметры производства окатышей ОЖК на обжиговых машинах ФОК АО «Михайловский ГОК им. А. В. Варичева»

№	Концентрат	Основность	Примечание	№ ОМ	Высота слоя сырых окатышей, мм	Диаметр окатышей, мм	Влажность окатышей, %	Скорость ОМ, м/мин	Производительность ОМ, т/час	Требование по прочности окатышей, кг/ок	Прочность, кг/ок	Удельный расход газа, м <sup>3</sup> /т	FeO в обожженных окатышах, %	Температура в зоне обжига (max), °С	Температура на границе слой-постель (max), °С
1	ОЖК	≈ 1,1 (по В2), MgO ≈ 0,27 %	Доменные окатыши для АО «Уральская сталь»	1, 2	330	11	9,65	4,39	583	225	227	10,7	0,31	1260	1191
				3	335	11	9,65	4,38	590		265	11	0,35	1290	1205
2	ОЖК	≈ 0,392 (по В3), SiO <sub>2</sub> ≈ 2,51 %	Окатыши на экспорт для Европы	1, 2	330	12,6	9,68	4,61	629	250	251	11,1	0,57	1260	1198
				3	335	12,6	9,68	4,58	635		252	10,7	0,35	1270	1202
3	ОЖК+Деррики Fe-70 %	≈ 0,25 (по В3)	Неофлюсованные на экспорт	1, 2	330	11,8	9,89	3,91	565	250	262	9,7	0,65	1250	1196
				3	335	11,8	9,89	4,53	665		263	9,1	0,91	1270	1105
4	ОЖК+Деррики Fe-67 % промшл.	≈ 0,15 (по В3)	Неофлюсованные на экспорт	1, 2	330	11,9	9,58	3,87	554	250	250	10,3	0,68	1250	1198
				3	335	11,9	9,58	4,31	627		256	9	0,66	1270	1196
5	ОЖК	≈ 1,0 (по В3), SiO <sub>2</sub> ≈ 2,55 %	Высокоосновные на экспорт	1, 2	330	13	9,4	3,4	457	280	290	14,3	0,53	1260	1217
				3	335	13	9,4	3,4	464		292	15,4	0,39	1270	1210
6	ОЖК	≈ 1,0 (по В3), SiO <sub>2</sub> ≈ 2,55 %	Высокоосновные на экспорт	1, 2	330	10,2	9,79	3,8	509	250	267	13,5	0,59	1260	1215
				3	335	10,2	9,79	3,8	517		251	12,4	0,47	1270	1173
7	ОЖК	≈ 0,39 (по В3 "DR-grade")	Окатыши для металлизации	1, 2	330	13,1	9,89	4,38	603	280	284	11,8	0,69	1260	1239
				3	335	13,1	9,89	4,38	612		282	9,2	0,56	1290	1243

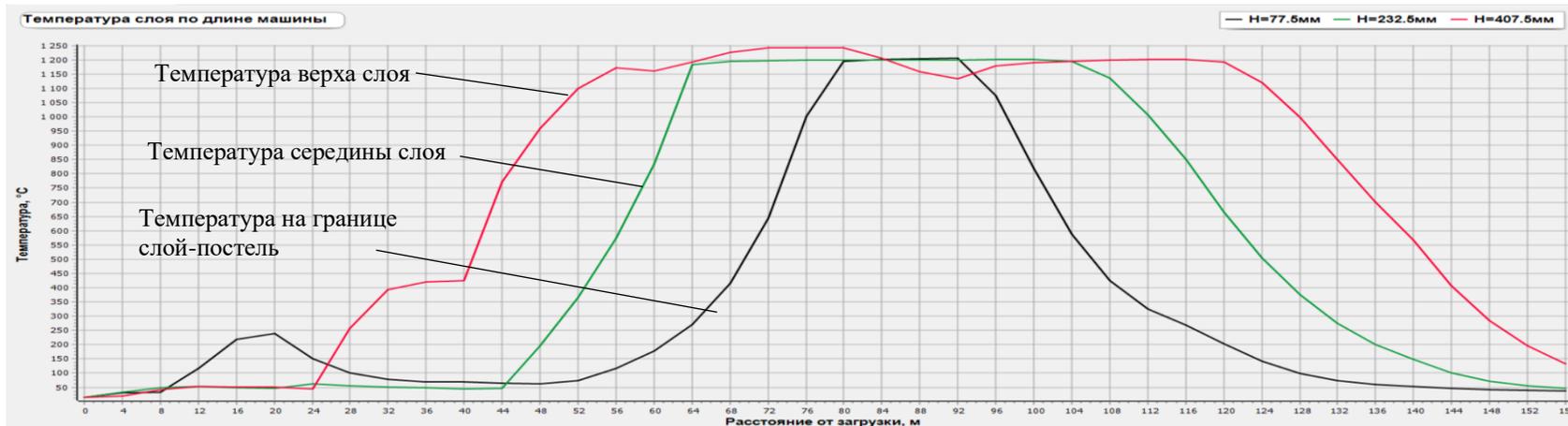


Рисунок 8 – Температура слоя окатышей, рассчитанная на математической модели ООО «НПВП ТОРЭКС» (для окатышей ОЖК «Доменные окатыши для АО «Уральская сталь»») (проба № 1 таблицы 6 на ОМ № 3)

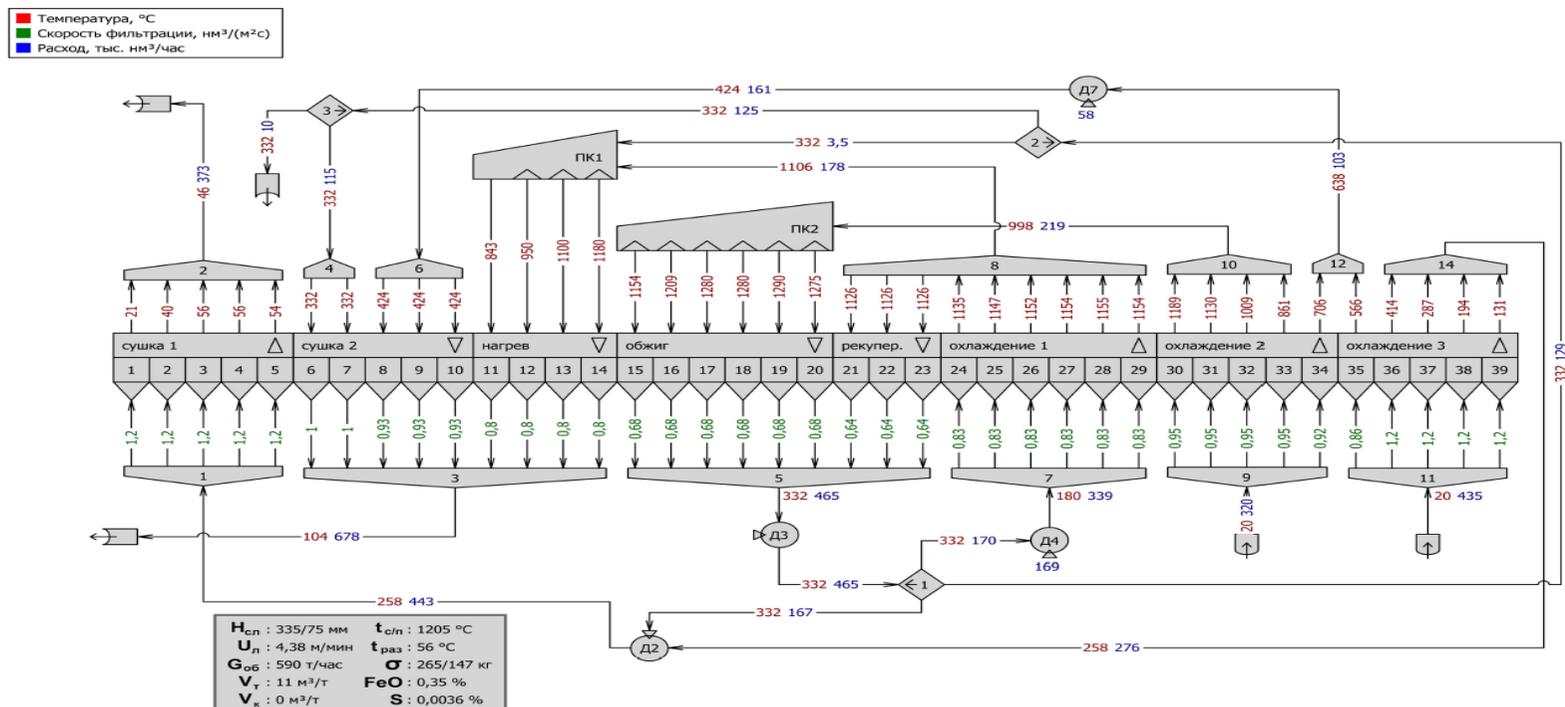


Рисунок 9 – Схема ОМ № 3 с параметрами, рассчитанными на математической модели при производстве окатышей ОЖК «Доменные окатыши для АО Уральская сталь» (проба № 1 таблицы 6)

Расчитанный на математической модели температурный режим обжига (рисунок 8) является инструкцией к применению для производства обожженных окатышей ОЖК, то есть следование такому режиму при промышленном производстве будет способствовать достижению качества окатышей, полученных при расчете на модели. Параметры тепловой схемы рисунка 9 позволяют оценить потребность в замене существующих тяго-дутьевых устройств (ТДУ).

Необходимо отметить, что полный перечень результатов расчета математической модели по всем 7-ми вариантам таблицы 6 передан АО «Михайловский ГОК им. А. В. Варичева» для оценки перспективы внедрения в производство концентрата ОЖК. При внедрении в производство окатышей ОЖК не потребуются реконструкция и модернизация обжиговых машин и доказана возможность производства окатышей ОЖК на действующих тепловых схемах ОМ.

В результате выполнения данной работы разработаны технологические и технические решения, способствующие обоснованному вовлечению в производство окатышей ОЖК из концентрата окисленных железистых кварцитов Михайловского месторождения. В технологические решения входят как рекомендации к производству окатышей ОЖК, так и необходимые для получения конкурентоспособных обожженных окатышей из концентрата ОЖК параметры производства. Перечислим некоторые из них:

1. Необходимо добавлять в шихту полимерное связующее в количестве 0,015 % от массы шихты.
2. Дозировка бентонита в шихту – 0,6 %.
3. Необходимо добавлять в шихту коксик в количестве 1 %.
4. Влажность сырых окатышей – 9,0–9,9 %
5. Температура в зоне обжига обжиговой машины – 1260–1290 °С.
6. Высота слоя окатышей постели – 70–85 мм.
7. Высота слоя сырых окатышей – 330–355 мм.
8. Скорость обжиговой машины – 3,4–4,6 м/мин.
9. Производительность обжиговой машины по обожженным окатышам – 450–665 т/ч.
10. Прочность обожженных окатышей – 227–292 кг/ок.
11. Удельный расход природного газа – 9,1–15,4 м<sup>3</sup>/т.
12. Содержание FeO в обожженных окатышах – 0,31–0,91 %.

Для каждого из 7-ми различных видов окатышей ОЖК разработаны технологические и режимные параметры производства на действующих обжиговых машинах АО «Михайловский ГОК им. А. В. Варичева», и максимально возможная их реализация при внедрении производства окатышей ОЖК будет способствовать обеспечению требуемого потенциальным заказчиком качества и производительности окатышей ОЖК.

Технические решения сводятся к следующему. Необходимо строительство на ФОК АО «Михайловский ГОК им. А. В. Варичева» участков по приему твердого топлива и полимерного связующего, их подготовки и введению в шихту окатышей.

#### *Добавление полимерного связующего в шихту ОЖК*

Полимерное связующее возможно поставлять на ФОК в бигбэгах и закачивать посредством пневмонасосов в бункер-дозатор. Дозатор рекомендуется шнековый со способностью дозирования  $\approx 50$ –150 кг/ч. Подачу полимерного связующего целесообразно осуществлять на конвейер концентрата на выходе с вакуум-фильтров, перед подачей бентонита и других флюсующих добавок.

#### *Добавление коксика в шихту ОЖК*

Для производства окатышей из концентрата ОЖК потребуются подшихтовка твердого топлива в виде измельченного коксика крупностью 0,071 мм не менее 90 % и с содержанием углерода 83–90 %. Измельченный коксик планируется получать из привозного коксика крупностью 0–5 мм железнодорожным транспортом. Рекомендуется строительство новых участков по приемке, складированию и переработке коксика: тепляк, склад и участок помола.

На рисунке 10 представлена схема ввода коксика в производство окатышей ОЖК.

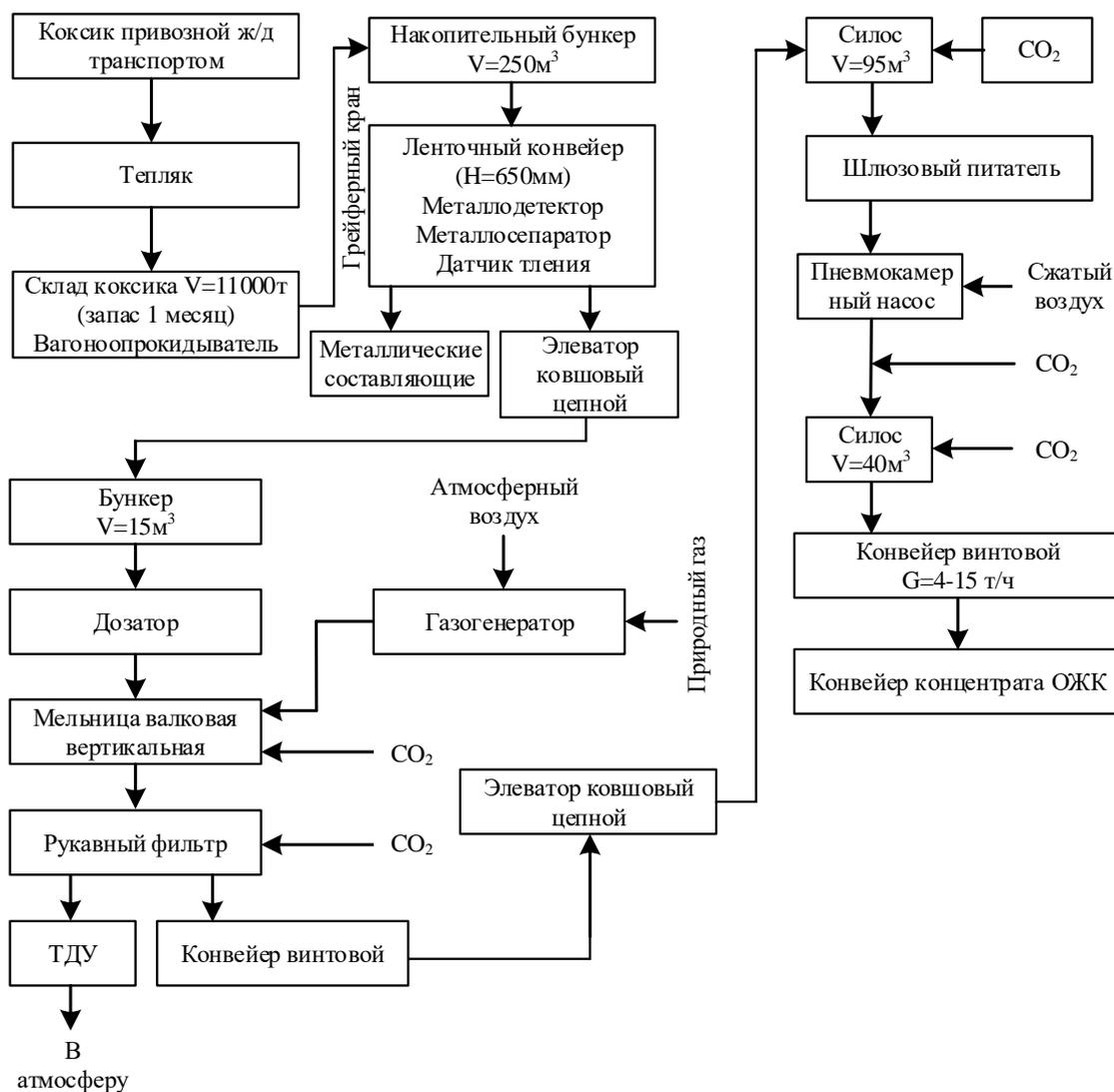


Рисунок 10 – Схема ввода коксика в производство окатышей ОЖК

Подробная проработка ввода полимерного связующего и коксика в производство окатышей ОЖК будет производиться в период разработки ТЭО (тенико-экономического обоснования) и выполнения работ по проектированию в зависимости от выбора конкретной обжиговой машины ФОК АО «Михайловский ГОК им. А. В. Варичева» для производства окатышей ОЖК. Также будет оценена необходимость строительства комплекса обжиговой машины для производства окатышей ОЖК. Ориентировочные капитальные затраты на строительство обжиговой машины мощностью 5 млн т/год могут составить до 65 млрд руб. (по состоянию на 2023 г.). При маржинальности окатышей на уровне 1,5...2,0 тыс. руб./т срок окупаемости инвестиций составит от 7 до 10 лет.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе обобщены результаты физико-химических, лабораторных, полупромышленных и расчетных исследований использования концентрата окисленных железистых кварцитов Михайловского месторождения для получения железорудных окатышей с требуемыми свойствами.

Основные научные и практические результаты диссертационной работы:

1. Получены новые результаты исследований химического состава и физических свойств шихтовых компонентов окатышей ОЖК.
2. Впервые определены дозировки шихтовых компонентов в зависимости от требований потенциальных заказчиков к химическому составу обожженных окатышей и получены новые

результаты исследования химического состава и физических свойств сырых и сухих обожженных окатышей ОЖК.

3. В промышленных условиях впервые опробована новая методика определения коэффициента пересчета прочности на сжатие лабораторных обожженных окатышей из вертикального пробника на прочность промышленных окатышей, которая повышает точность и надежность оценки их механических свойств.

4. По результатам исследования свойств полупромышленных обожженных окатышей ОЖК впервые определены требуемые температурные режимы обжига окатышей при различных производительностях действующей конвейерной обжиговой машины АО «Михайловский ГОК им. А. В. Варичева».

5. С использованием усовершенствованной математической модели термообработки окатышей, учитывающей горение углерода, определены оптимальные режимные параметры работы обжиговых конвейерных машин АО «Михайловский ГОК им. А. В. Варичева» для производства окатышей для различных потребителей.

6. Разработаны технические и технологические решения для производства окатышей с использованием концентрата ОЖК Михайловского месторождения, которые обеспечивают повышение эффективности процесса производства и качество готовой продукции.

### **Рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы**

Разработка рабочей документации для реализации предложенных технических решений. Углубленные исследования металлургических свойств окатышей ОЖК различного шихтового состава и разработка мероприятий по их повышению (при необходимости).

Вовлечение в производство окатышей концентрата ОЖК на АО «Михайловский ГОК им. А. В. Варичева» будет способствовать внедрению в производство сырья попутной добычи на других предприятиях. Практическая реализация данного проекта создаст условия для снижения экологической нагрузки в регионе Курской магнитной аномалии и высвобождения занятых плодородных земель Черноземья, что станет примером рационального и комплексного освоения минерального сырья.

### **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

Основное содержание работы отражено в следующих публикациях:

*статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ:*

1. Берсенева, И. С. О влиянии силикатной связки на прочность железорудных окатышей из концентратов высокой степени обогащения / И. С. Берсенева, **Г. Г. Бардавелидзе**, А. Ю. Поколенко, Н. А. Спирина, В. С. Усков, А. А. Сушкевич // *Сталь*. – 2023. – № 7. – С. 2–6. 0,3 п.л./0,05 п.л.

*Berseneva, I. S. About the Influence of Silicate Binding on Strength of Iron Ore Pellets from Highly Enriched Concentrates / I. S. Berseneva, **G. G. Bardavelidze**, A. Y. Pokolenko, N. A. Spirin, V. S. Uskov, A. A. Sushkevich // *Steel in Translation*. – 2023. – Vol. 53. – № 8. – P. 669–674. 0,3 п.л./0,05 п.л. (Scopus).*

2. Берсенева, И. С. Особенности структуры железорудных окатышей в зависимости от степени обогащения концентрата / И. С. Берсенева, В. В. Брагин, А. И. Груздев, **Г. Г. Бардавелидзе**, А. Ю. Поколенко, Н. А. Спирина // *Сталь*. – 2023. – № 3. – С. 2–8. 0,5 п.л./0,083 п.л.

*Berseneva, I. S. Features of the Iron Ore Pellets Structure Depending on the Concentrate Enrichment Degree / I. S. Berseneva, V. V. Bragin, A. I. Gruzdev, **G. G. Bardavelidze**, A. Y. Pokolenko, N. A. Spirin // *Steel in Translation*. – 2023. – Vol. 53. – № 4. – P. 328–335. 0,5 п.л./0,083 п.л. (Scopus).*

3. Усольцев, Д. Ю. О формировании пористости офлюсованных железорудных окатышей / Д. Ю. Усольцев, И. С. Берсенева, **Г. Г. Бардавелидзе**, Э. Р. Сабиров, Н. А. Спирина, Г. Е. Исаенко // *Сталь*. – 2022. – № 9. – С. 2–6. 0,3 п.л./0,05 п.л.

*Usol'tsev, D. Y. On the Formation of Porosity in Fluxed Iron-Ore Pellets / D. Y. Usol'tsev, I. S. Bersenev, G. G. Bardavelidze, E. R. Sabirov, N. A. Spirin, G.E. Isaenko // Steel in Translation. – 2022. – Vol. 52. – № 9. – P. 859–863. 0,3 п.л./0,05 п.л. (Scopus).*

4. Бардавелидзе, Г. Г. Исследование окатышей из концентрата окисленных железистых кварцитов АО «Михайловский ГОК» / Г. Г. Бардавелидзе, В. В. Брагин, Н. А. Спири, С. П. Пигарев // *Металлург.* – 2021. – № 12. – С. 11–18. 0,6 п.л./0,3 п.л.

*Bardavelidze, G. G. Examination of pellets made from concentrate of oxidized ferruginous quartzites of Mikhailovsky GOK / G. G. Bardavelidze, V. V. Bragin, N. A. Spirin, S. P. Pigarev // Metallurgist. – 2022. – Vol. 65. – № 11–12. – P. 1351–1360. 0,6 п.л./0,3 п.л. (Scopus/WoS).*

5. Берсенева, И. С. Анализ влияния дисперсии прочности железорудных окатышей на выход мелочи / И. С. Берсенева, В. В. Брагин, Г. Г. Бардавелидзе, А. Ю. Поколенко // *Сталь.* – 2020. – № 11. – С. 17–20. 0,2 п.л./0,05 п.л.

6. Бижанов, А. М. Металлургические свойства доменных брикетов экструзии (брэкс) на основе гематитового концентрата / А. М. Бижанов, В. В. Брагин, Г. Г. Бардавелидзе, С. П. Пигарев // *Металлург.* – 2020. – № 9. – С. 17–25. 0,7 п.л./0,175 п.л.

*Bizhanov, A. M. Metallurgical properties of blast furnace extruded briquettes (BRES) based on hematite concentrate / A. M. Bizhanov, V. V. Bragin, G. G. Bardavelidze, S. P. Pigarev // Metallurgist. – 2021. – Vol. 64. – № 9–10. – P. 862–874. 0,7 п.л./0,175 п.л. (Scopus/WoS).*

7. Вохмякова, И. С. Исследование некоторых закономерностей процесса окомкования гематитовых концентратов / И. С. Вохмякова, С. И. Поколенко, Р. А. Полуяхтов, Г. Г. Бардавелидзе, С. Н. Гушин // *Сталь.* – 2010. – № 9. – С. 30–31. 0,1 п.л./0,02 п.л.

*Vokhmyakova, I. S. Pelletization of hematite concentrates / I. S. Vokhmyakova, S. I. Pokolenko, R. A. Poluyakhtov, G. G. Bardavelidze, S. N. Gushchin // Steel in Translation. – 2010. – Vol. 40. – № 9. – P. 830–832. 0,1 п.л./0,02 п.л. (Scopus).*

8. Усольцев, Д. Ю. Опыт модернизации оборудования и технологии получения сырых окатышей. / Д. Ю. Усольцев, Г. Г. Бардавелидзе, В. Н. Неволин, Р. А. Полуяхтов, А. В. Стародумов. // *Сталь.* – 2010. – № 9. – С. 5–7. 0,15 п.л./0,03 п.л.

#### **Другие публикации:**

9. Берсенева, И. С. Современные проблемы окускования железорудного сырья / И. С. Берсенева, В. В. Брагин, А. А. Солодухин, А. Ю. Поколенко, Г. Г. Бардавелидзе, Н. А. Спири // В сборнике: *Металлургия : технологии, инновации, качество. Труды XXII Международной научно-практической конференции. В 2-х частях. Под общей редакцией А. Б. Юрьева. Новокузнецк: СибГИУ, – 2021. – С. 32–37. 0,4 п.л./0,066 п.л.*

10. Бардавелидзе, Г. Г. Особенности полупромышленной термообработки лабораторных окатышей на действующей обжиговой машине / Г. Г. Бардавелидзе, Н. А. Спири // XI Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве» (ТИМ'2023) с международным участием. Екатеринбург. – 2023. – С. 15–20. 0,4 п.л./0,3 п.л.