

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»
Институт новых материалов и технологий
Кафедра теплофизики и информатики в металлургии



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. Металлургия черных, цветных и редких металлов

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
д-р техн. наук, профессор
Спирин Николай Александрович

Екатеринбург – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР	9
1.1 Особенности технологии получения железорудных окатышей на обжиговой конвейерной машине	9
1.2 Особенности термообработки окатышей из гематитового концентрата на конвейерной обжиговой машине	15
1.3 Некоторые характеристики опыта производства обожженных окатышей из гематитового концентрата в России и за рубежом	24
1.4 Обогащение руд окисленных железистых кварцитов (ОЖК) Михайловского месторождения	27
1.5 Выводы и задачи исследования	33
2 ИССЛЕДОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ШИХТОВЫХ КОМПОНЕНТОВ ОКАТЫШЕЙ ОЖК.....	35
2.1 Химический анализ и физические свойства шихтовых компонентов окатышей ОЖК.	35
2.2 Минералогический анализ концентратов для получения окатышей ОЖК.....	44
2.3 Седиментационный анализ концентратов для наработки окатышей ОЖК	50
2.4 Выводы по главе 2	54
3 ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕРИАЛЬНЫХ БАЛАНСОВ ШИХТОВЫХ СОСТАВОВ, ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СЫРЫХ И СУХИХ ОКАТЫШЕЙ ОЖК	56
3.1 Материальный баланс процесса окомкования и обжига и шихтовый состав окатышей ОЖК.....	56
3.2 Нарботка партий сырых и сухих окатышей ОЖК в лабораторных условиях	64
3.3 Анализ физических свойств сырых и сухих окатышей ОЖК.....	71
3.4 Выводы по главе 3	73
4 ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОМЫШЛЕННЫХ ОБОЖЖЕННЫХ ОКАТЫШЕЙ ОЖК И РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО ИХ ПРОИЗВОДСТВУ.....	74
4.1 Исследование полупромышленных испытаний по получению обожженных окатышей ОЖК	74
4.2 Параметрическая идентификация экспериментальных показателей прочности обожженных окатышей к условиям функционирования обжиговой машины	82
4.3 Анализ результатов исследования полупромышленных испытаний	86
4.4 Исследование металлургических свойств обожженных окатышей ОЖК.....	97
4.5 Исследование процессов обжига окатышей из концентрата ОЖК методом математического моделирования и разработка режимных параметров производства обожженных окатышей из концентрата ОЖК на действующих обжиговых машинах АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева».....	102

4.6 Технические и технологические решения производства окатышей на обжиговых машинах АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева» из концентрата окисленных железистых кварцитов Михайловского месторождения	119
4.7 Выводы по главе 4	124
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	126
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	127
Приложение А. Акт использования результатов работы	135
Приложение Б. Характеристика анализатора HELOS.....	136
Приложение В. Результаты расчета материального баланса «окомкования и обжига».....	138
Приложение Г. Основные формулы для расчета в математической модели ООО «НПВП ТОРЭКС»	142

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Устойчивая тенденция увеличения спроса на высококачественное железорудное сырье определяет необходимость как увеличения объемов производства, так повышения его служебных свойств и снижения затрат на его производство.

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

Внедрение в производство новых видов руд и концентратов является важной задачей сохранения и развития промышленного потенциала экономики России [1]. В условиях металлургии Российской Федерации перспективным является использование гематитовых руд, запасы которых составляют 7 млрд тонн [2], что составляет $\approx 5\%$ от общего ресурса железорудного сырья РФ (138,3 млрд т).

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 «хвосты». Гематитовые материалы являются, в том числе, вторичным продуктом обогащения магнетитовых руд, таким образом, актуальность их использования не вызывает сомнений.

Повышение сложности добычи традиционных магнетитовых руд, удорожание выпуска концентрата и другие факторы создают предпосылки для промышленного освоения технологии использования концентрата из окисленных железистых кварцитов (ОЖК) для производства окатышей. Разработка и реализация эффективной технологии обогащения окисленных железистых кварцитов (ОЖК) всегда стояла в ряду приоритетных задач черной металлургии нашей страны.

В результате обогащения магнетитовых руд Михайловского месторождения (Курская обл., г. Железногорск АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева») сформировалось хвостохранилище [4], содержащее в том числе окисленные железистые кварциты (гематитовое сырье ОЖК) [5]. Потенциал производства гематитового концентрата из хвостов технологического процесса огромен. Помимо хвостов текущего производства (27млн тонн в год), имеются «лежалые» хвосты. В техногенном месторождении АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева» (хвостохранилище) за складировано более чем 563 млн тонн (на 2010 год) переработанных и готовых к дальнейшей переработке отходов обогатительного производства [6]. Стратегия развития АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева» направлена на увеличение объемов производства железорудной продукции. В связи с этим, задача уточнения технологии и 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 совершенствования технологии производства обожженных окатышей ОЖК.

Внедрение в переработку ОЖК попутной добычи является весьма перспективным и экономичным источником повышения производства концентратов без увеличения добычи магнетитовых руд [3]. При этом исключается потребность в дополнительной площади для складирования руды и, соответственно, улучшается экологическая обстановка в районе добычи. Дальнейшее развитие данного проекта создает условия для снижения

экологической нагрузки в регионе Курской магнитной аномалии и высвобождения занятых плодородных земель Черноземья, а также станет примером рационального и комплексного освоения минерального сырья [7, 8].

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.И. Gallagher, D. Papanastassion, G. Bitsianes, A.C.D. Chaklader, D.F. Ball, F.G. Butter.

Концентрат ОЖК Михайловского месторождения - 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 осуществлялось. 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 поведения при различных стадиях его 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.

6. 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» (Приложение А).

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 учёных «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 учёных «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 в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, из них 6 статей в журналах, индексируемых в международных базах данных Scopus, WoS, и 2 печатные работы в других изданиях.

Структура и объём диссертации

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

Благодарность

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.т.н., профессору, 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» к.т.н. С.П. Пигареву за помощь в проведении исследований.

1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

1.1 Особенности технологии получения железорудных окатышей на обжиговой конвейерной машине

Производство окатышей в РФ составляет более 40 млн т в год и обеспечивает до 30% железорудного сырья в доменном производстве и 100% при реализации технологии металлизации в шахты печах Midrex и Hyl. Технико-экономические показатели производства окатышей определяются работой обжиговых машин, на которых осуществляется их конечная термическая обработка. В 1964 году на Соколовско-Сарбайском горно-обогатительном комбинате (г. Рудный, Казахстан, СССР) была введена в эксплуатацию первая отечественная обжиговая конвейерная машина ОК-108, изготовленная на Уралмашзаводе.

Ниже представлена технологическая схема производства обожженных окатышей (рисунок 1.1).

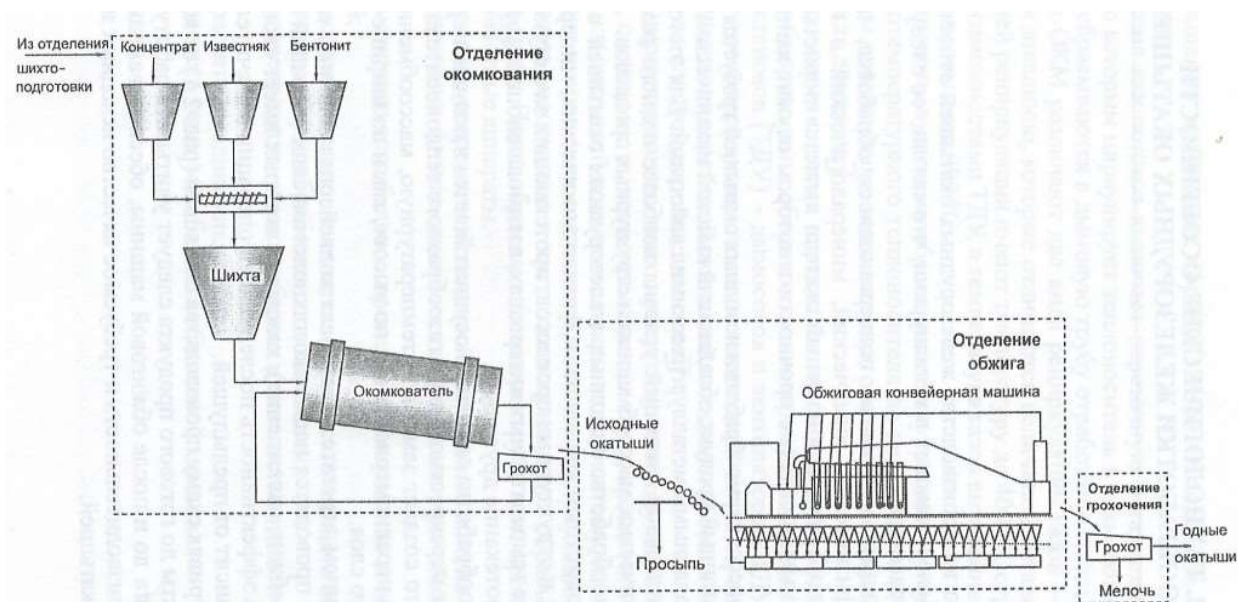


Рисунок 1.1 – Технологическая схема производства обожженных окатышей

Компоненты шихты загружаются в бункеры, затем дозаторами и конвейерным транспортом подаются в смесители, где компоненты шихты перемешиваются в однородную массу. Далее дозаторами и конвейерами однородная шихта, для получения сырых окатышей, подается в окомкователи, в которые по необходимости мелкодисперсно распыляется вода. Из окомкователей окатыши поступают на грохоты, которые выделяют годный класс. С грохотов окатыши поступают на сборный конвейер, транспортирующий их на роликовый питатель. Роликовый питатель удаляет мелочь (некондиционный класс) и транспортирует кондиционные сырые окатыши на обжиговую машину. На тележках обжиговой машины формируется слой сырых окатышей. Далее производится сложный процесс термообработки слоя окатышей в обжиговой машине, включая сушку слоя сырых окатышей, нагрев, обжиг и охлаждение [9-16, 108]. С обжиговой машины окатыши

выгружаются в бункер выравниватель температур. С бункера выравнивателя окатыши посредством конвейеров поступают на грохот, который отделяет мелочь. Далее часть окатышей поступает обратно в производство, для формирования донной и бортовой постели, а большая часть окатышей транспортируется в склад готовой продукции.

Рассматривая схему производства окатышей от компонентов шихты до готового продукта, следует учитывать работу каждого агрегата до и после обжиговой машины, обеспечивающих заданную производительность и требуемое качество исходных и обожженных окатышей.

Тепловая схема обжиговой конвейерной машины (ОКМ) должна обеспечить реализацию режима термообработки слоя окатышей с целью получения наиболее высоких металлургических свойств [10-12, 107]. Другим не менее важным назначением современной тепловой схемы является достижение максимальных технико-экономических показателей работы обжиговых машин с минимальными вредными выбросами в атмосферу [13-18].

Тепловая схема обжиговой конвейерной машины объединяет технологическую схему, теплотехническую часть и схему газопотоков (рисунок 1.2).

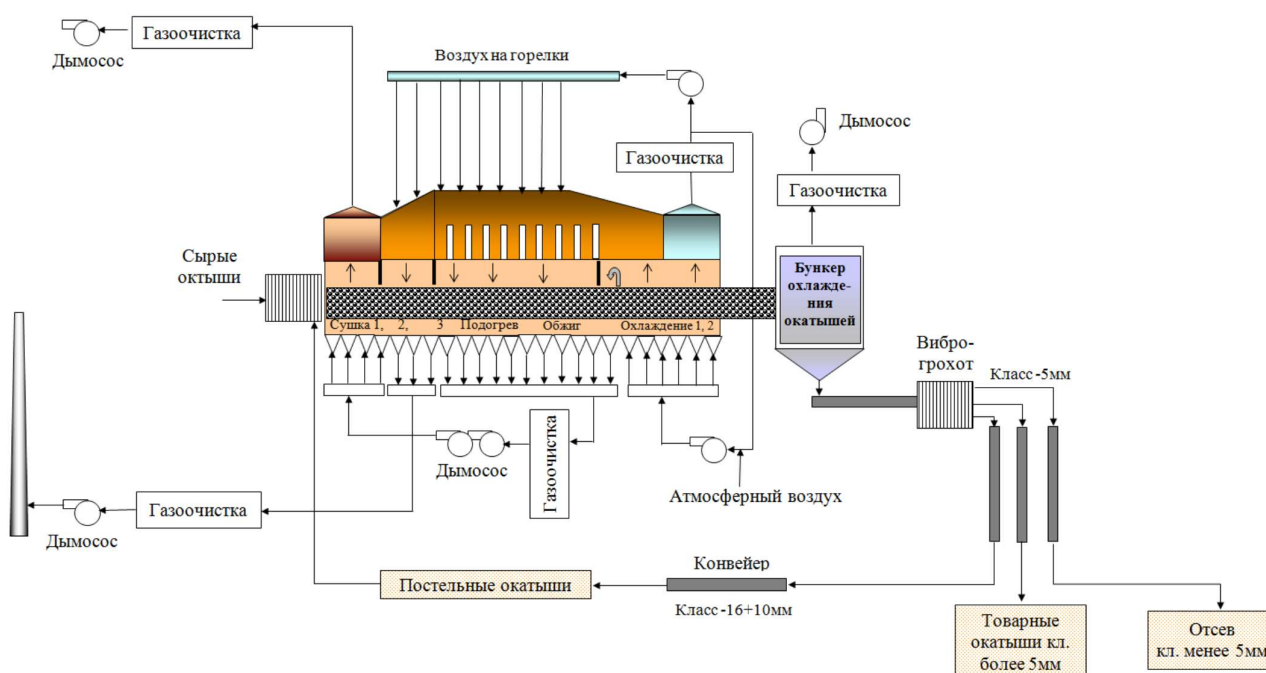


Рисунок 1.2 – Принципиальная схема обжиговой конвейерной машины

Технологическая схема определяет режим термообработки слоя окатышей в различных, по происходящим физико-химическим процессам, зонах обжиговой конвейерной машины [19].

В соответствии с технологией режим термообработки окатышей осуществляется в пяти зонах: сушки, нагрева, обжига, рекуперации и охлаждения, в которых реализуются процессы: сушки слоя окатышей, окисления магнетита до гематита, разложения известняка, спекания и упрочнения окатышей. Если на входе обжиговой машины окатыши имеют содержание FeO-25-29% и прочность на сжатие 10-15 Н/ок, то на сходе с машины FeO-0,5-1,8% и прочность 2-3,5 кН/ок.

Температурно-временной фактор является основным технологическим параметром обжига слоя окатышей на ОКМ (обжиговая конвейерная машина). В зоне сушки температура поддерживается на уровне 250-600°C. В зоне нагрева осуществляется плавный подъем температуры с 700 до 1200°C. В зоне обжига температура устанавливается, в зависимости от типа концентрата и степени офлюсования шихты окатышей, в диапазоне 1250–1350 °С.

Нагрев слоя осуществляется за счет конвективного теплообмена между газом-теплоносителем и окатышами и зависит от скорости фильтрации газа через слой. На действующих обжиговых машинах скорость нагрева и охлаждения окатышей находится в пределах 70-110 град/мин. при скорости фильтрации газа 0,5-1,3 м/с.

Теплотехническая часть ОКМ определяется рабочим пространством, в котором происходит, нагрев слоя окатышей путем сжигания топлива и использования теплоты обожженных окатышей из зоны охлаждения.

Окатыши нагреваются в рабочем пространстве, разделенном на различные по температурному уровню зоны, фильтрацией теплоносителя через слой. В зонах сушки 1 и охлаждения теплоноситель фильтруется через слой снизу-вверх (продувом), а в зонах сушки 2-3, нагрева, обжига и рекуперации сверху вниз (прососом).

Прогрев слоя завершается в зоне рекуперации, где осуществляется перенос теплоты из верхнего горизонта на границу слой-постель. Обожженные окатыши донной постели предохраняют обжиговые тележки от перегрева. Сжигание топлива производится в горелках, установленных с обеих сторон горна [52].

Схема газопотоков включает переточную и газоходную системы, по которым циркулирует теплоноситель в технологических зонах и сбрасываются в дымовую трубу отработанные газы.

Переточная система обеспечивает внутреннюю рециркуляцию высокотемпературного теплоносителя по переточным коллекторам из зоны охлаждения в зоны нагрева, обжига и рекуперации за счет перепада давления.

Газоходная система определяет внешнюю рециркуляцию газов (по трубопроводам и сборным коллекторам) с помощью тягодутьевых установок (ТДУ) - дымососов и вентиляторов. ТДУ осуществляют транспортировку газов по газоходной системе, фильтрацию теплоносителя через слой окатышей в технологических зонах и создают над слоевой перепад давления.

В циркулирующих газах присутствуют продукты сгорания топлива, оксиды азота, возможны оксиды серы, кроме того, в процессе сушки окатышей появляются пары воды, поэтому, из-за накопления этих химических соединений, полную рециркуляцию газов организовать невозможно и часть газов приходится сбрасывать в дымовую трубу. Перед сбросом в дымовую трубу газы проходят через газоочистные аппараты.

Процесс обжига окатышей, безусловно, сложнейший из существующих, в результате наличия физико-химических процессов, в том числе окисление магнетита и диссоциация гематита [20]. Завершенность ФХП определяется временем пребывания слоя в каждой секции. Это время зависит от скорости движения ленты, высоты слоя, скорости нагрева, длины секции L (рисунок 1.3).

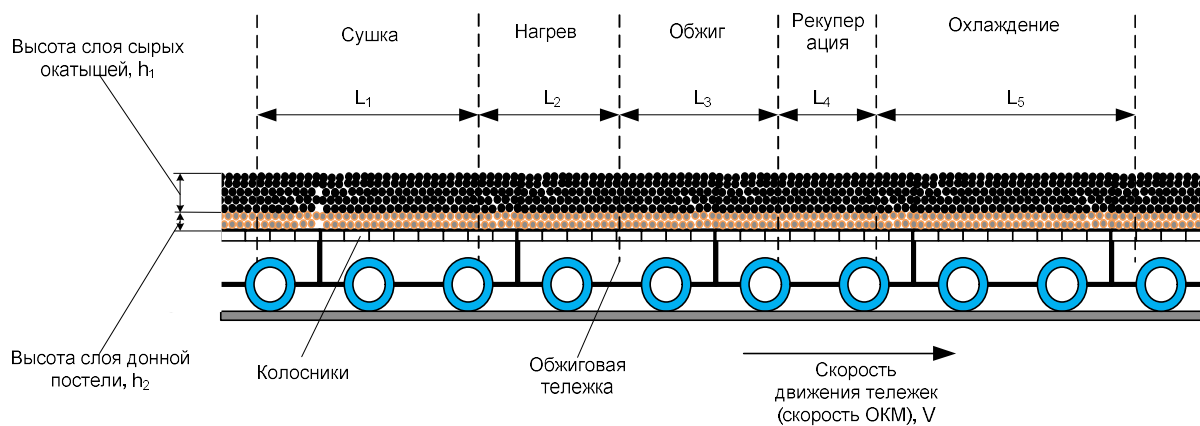


Рисунок 1.3 – Обжиговые тележки со слоем окатышей

Фактически для окатышей нижних горизонтов слоя тепловые и другие превращения находят завершение в последующих секциях (сушка в зоне нагрева, декарбонизация в зоне обжига, окисление в зоне рекуперации и т. д.). С ростом скорости ленты эта незавершенность увеличивается. Увеличение длины секции возможно за счет уменьшения другой. Таким образом, оптимальный процесс термообработки должен установить соотношение длин секций, скорость ленты и высоту слоя.

На работу обжиговой машины накладывается ряд ограничений, определяемых максимально допустимыми температурами колосников конвейерных тележек, ТДУ и режимами их работы, близкими к предельным. Как правило, ОКМ эксплуатируется на предельных значениях по температуре тележек, мощности ТДУ. Поэтому изменение параметров термообработки окатышей ограничено по максимальным скоростям фильтрации теплоносителя, по температуре рециркуляционных потоков и уходящих газов.

В процессе термообработки на ОКМ исходные окатыши подвергаются сушке, нагреву, обжигу и охлаждению. В результате этого из окатышей удаляется вода при сушке, диоксид углерода при разложении известняка, диоксид серы при десульфурации и поглощается кислород при окислении магнетита и серы (рисунок 1.4) [21]. При термообработке окатышей, находят развитие твердо- и жидкофазные реакции образования соединений, составляющих упрочняющую связку, непрерывно протекает процесс спекания зерен шихты и связки. Все это влияет на качественные показатели окатышей. На рисунке 1.4 изображены твердофазные и жидкофазные спекания. Твердофазное спекание протекает только между зернами, соприкасающимися рудной частью. Жидкая фаза появляется из пустой породы, за счет легкоплавких минералов пустой породы.

В случае наличия в пустой породе тугоплавких минералов, возникает необходимость ввода флюсов, соотношение компонентов в которых, позволяют образовать легкоплавкие элементы. Таким образом, жидкую фазу образуют именно внесенные из вне, флюсы. Образовавшаяся жидкая фаза также «склеивает» зерна концентрата, создавая дополнительные мостики прочности [22].

Достаточное количество жидкой фазы в окатыше для необходимой прочности – 8-10% [23]. Избыток жидкой фазы может привести к уменьшению количества пор окатыша и его плавлению.

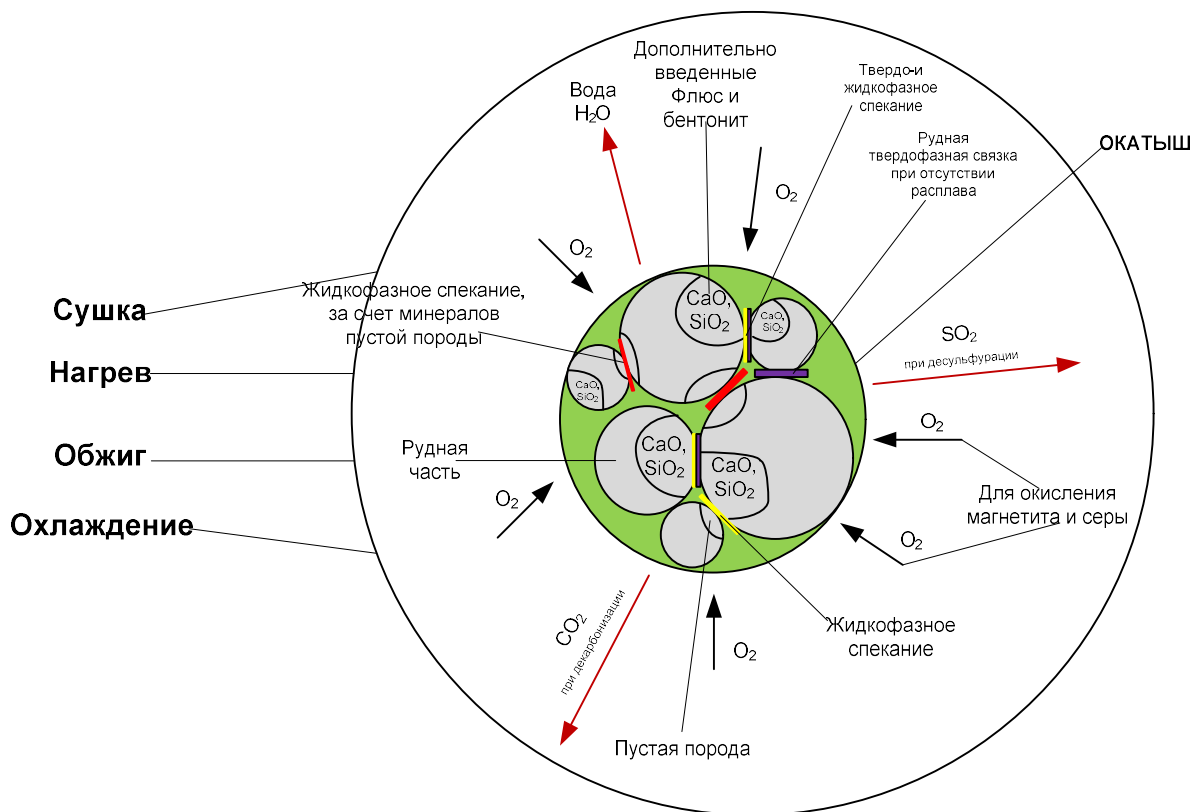
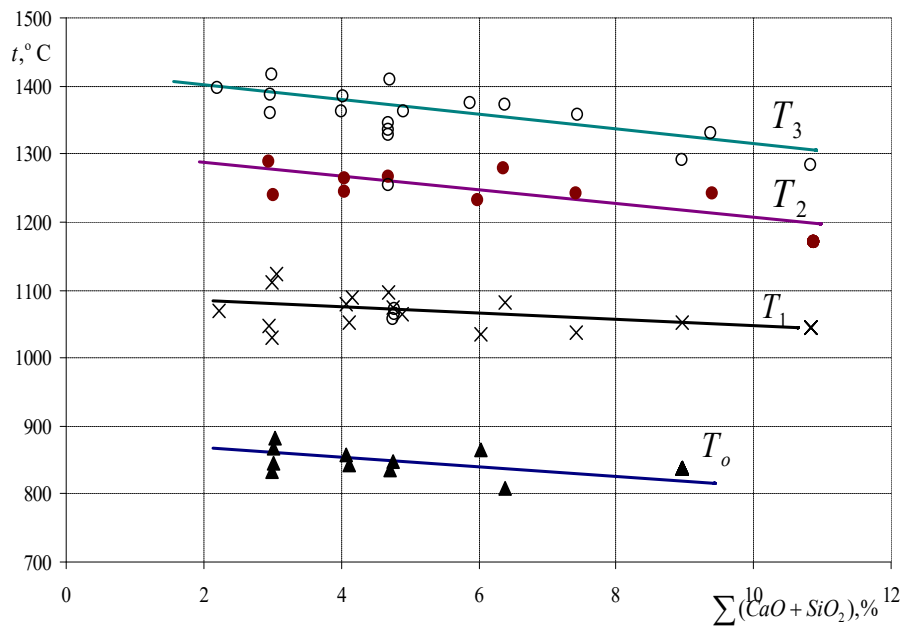


Рисунок 1.4 – Процессы в окатыше при термообработке

Рисунок 1.4 обобщенно представляет основные физико-химические процессы при термообработке окатышей, включая твердофазное и жидкофазное спекания.

На рисунке 1.5 представлен график, характеризующий очередность протекания твердофазных и жидкофазных спеканий в зависимости от температуры и содержания шлакообразующих элементов [19, 24]. Необходимо отметить, что данный график характеризует окатыши из концентрата руды КМА (КМА – Курская магнитная аномалия).



- T_0 – температура начала спекания;
- T_1 – температура начала интенсивного твердофазного спекания;
- T_2 – температура начала жидкофазного спекания;
- T_3 – температура образования спеков.

Рисунок 1.5 – Зависимость характерных температур спекания офлюсованных и нефлюсованных окатышей КМА от количества шлакообразующих $\sum(CaO + SiO_2), \%$

Большое значение для выбора режима термообработки имеет состав шихты исходных окатышей [25-31]. Для этого в шихту вводят флюс ($CaCO_3$ - известняк) и бентонит (в основном оксид кремния SiO_2).

Введение флюсов в состав шихты окатышей необходимо для понижения температуры плавления пустой породы железной руды, образования прочных окатышей и легкоплавкого жидкотекучего шлака, который легко выходит из доменной печи.

Бентонит добавляет в шихту для повышения эффективности окомкования, придания окатышам необходимых механических свойств во влажном и, особенно, сухом состоянии [32].

Обжиг нефлюсованных окатышей необходимо проводить при плавном режиме нагрева, обеспечивающем более полное протекание физико-химических процессов. Требование к сушке нефлюсованных окатышей более строгое, в связи со склонностью их растрескиваться в период переувлажнения. Поэтому сушка их должна быть менее интенсивной, чем офлюсованных окатышей. Получение окисленных незональных гранул сопровождается условием последовательного протекания процессов окисления и спекания. Это условие выполняется при плавном режиме нагрева и позволяет получать однородные по структуре, очень плотные окатыши с хорошими показателями прочности на сжатие. Ограничение на скорость нагрева помимо сушки оказывает влияние скорость протекания окисления магнетита. Процесс спекания интенсифицируется с увеличением скорости нагрева. Тем более, что неразобщенные пустой породой и флюсом зерна магнетита, в однородных по составу нефлюсованных окатышах, спекаются очень быстро. Упрочнение

здесь в основном происходит за счет развития твердофазных реакций, поскольку малое количество шлакообразующих соединений не позволяет интенсифицировать жидкофазное спекание.

Увеличение степени офлюсования окатышей требует более жестких условий к режиму термообработки [33-38]. Обжиг офлюсованных окатышей усложняется наличием известняка, который в процессе нагрева должен продиссоциировать, а получившаяся известь усвоиться с образованием жидкой фазы [39]. Температура шока офлюсованных окатышей выше, чем неофлюсованных, поэтому сушка может быть более интенсивной. После сушки офлюсованные окатыши необходимо с максимальной скоростью нагреть до температуры интенсивного разложения известняка. Это позволит сократить время обжига, так как известняк продиссоциирует в минимальное время и до начала процессов интенсивного окисления и спекания.

При развитии окисления более активно спекается внешняя гематитовая оболочка, что затрудняет выход диоксида углерода. Быстрый нагрев, приводящий к бурному выделению CO_2 , который затормаживает окисление, позволяет получить высокопористую структуру окатыша, что создает благоприятные условия для последующего окисления магнетита и интенсификации спекания. Упрочнение в основном происходит за счет жидкофазного спекания, т.к. шлакообразующие элементы затормаживают образование плотного гематитового каркаса, поэтому в зоне умеренных температур формируется состав связки. При протекании твердофазных реакций происходит усвоение извести и, таким образом, предопределяются металлургические свойства готовых окатышей.

При нагреве, оптимальном для офлюсованных окатышей, протекание физико-химических процессов происходит в следующей последовательности: сушка - интенсивное разложение известняка с незначительным окислением магнетита - активное развитие окисления - развитие твердофазных реакций с усвоением извести и спекание в твердой фазе - спекание с участием жидкой фазы.

Подводя итог анализу режима термообработки окатышей на обжиговой машине следует отметить, что, если структура слоя и последующий качественный прогрев закладываются в зоне сушки, то металлургические свойства окатышей формируются в зоне нагрева, где активно развиваются ФХП. Обжиг завершая процессы, происходящие в окатышах на основе жидкофазного спекания, окончательно фиксирует фазовый состав, структуру и качество готового продукта.

1.2 Особенности термообработки окатышей из гематитового концентрата на конвейерной обжиговой машине

Гематит – безводный оксид железа Fe_2O_3 . Гематитовые руды, как правило, образуются в результате выветривания магнитных железняков.

Обобщая опыт исследований в области металлургической переработки железосодержащих руд, в том числе использование железорудной пыли [40], следует отметить, что, основным направлением переработки гематитовых руд является производство окускованного сырья – окатышей и агломерата [42, 68, 112].

Производство окатышей из гематитовых руд широко распространено в железорудной отрасли многих иностранных государств, особенно импортеров сырья – Бразилии и Австралии.

Некоторые особенности применения гематитового концентрата при получении окатышей для доменного производства

В магнетите Fe_3O_4 железо и кислород прочно связаны между собой, таким образом данная руда относится к классу трудновосстановимых, в то время как гематит относится к легковосстановимым рудам [41].

Многочисленные данные исследований процесса окомкования тонкоизмельчённых концентратов различного вещественного состава [43, 44] не выявили значительной разницы комкуемости между магнетитовым и гематитовым сырьем при значительном содержании фракций менее 0,1 мм. Однако, гематитовые концентраты, полученные флотацией, могут быть плохо комкуемыми.

Так, кристаллический гематит благодаря пластинчатому строению окомковывается хуже, чем магнетитовый концентрат, а использование различных реагентов при флотационном обогащении гематитовых концентратов приводит к образованию гидрофобной оболочки на их поверхности и значительному снижению смачиваемости [45]. Одним из способов повысить комкуемость таких материалов является разрушение этой оболочки за счёт отмывки, окисления реагентов, доизмельчения. Наиболее существенно увеличивается комкующая способность частиц после доизмельчения, поскольку в этом случае обновляется поверхность зерен и образуются более тонкие фракции частиц.

Изучению механизмов и кинетики восстановления гематита посвящено достаточно работ [46-50]. Упрочнение окатышей обжигом из гематитовых руд и концентратов, а также их смесей с другими рудами осуществляется в тех же агрегатах, что и чисто магнетитовых, однако характер протекающих при этом процессов несколько различен.

Гематитовые концентраты имеют на 50-100°C более высокую температуру начала размягчения по сравнению с магнетитовыми концентратами и на 30-80°C шире интервал температур размягчения по сравнению с магнетитовыми концентратами. Теплоёмкость гематитовых концентратов, как правило, на 20-30% ниже, чем магнетитовых, однако при обжиге окатышей из магнетитового сырья выделяется теплота (623,8 кДж/кг) при окислении магнетита до Fe_2O_3 .

Использование при производстве окатышей окисленных руд, содержащих гидроокислы, увеличивает кажущуюся теплоёмкость материала (в связи с затратами теплоты на удаление гидратной влаги) и накладывает ограничения на температурный и тепловой режим сушки и обжига окатышей (ограничивают скорости нагрева, сушки, максимальные температуры и др.). Термообработка окатышей из гематитовых руд требует более высоких температур обжига и большей, по сравнению с магнетитовым сырьём, длительности процесса [51]. Необходимость повышенных температур при обжиге, отсутствие внутреннего источника теплоты от окисления магнетита, большая продолжительность процесса – всё это обуславливает повышенный расход теплоты на термообработку окатышей из гематитового сырья. В Бразилии, например, эту проблему решают за счёт добавки в шихту окатышей угля (1 – 2%).

Таким образом, при использовании гематитовых руд вероятно:

- рост удельных энергозатрат;
- снижение производительности;
- изменение режима окомкования (в том числе, возможно, увеличение расхода бентонита).

Твердое топливо, введенное в шихту, является дополнительным источником теплоты, интенсификатором процесса теплообмена в слое окатышей, восстановителем оксидов железа, регулятором химического и фазового состава и структуры обожженных окатышей [46].

Особенностей применения твердого топлива чрезвычайно много. Они связаны, в частности, с зольностью угля, количеством летучих, активностью топлива, химическим составом золы, химическим составом руд, поступающих на окомкование, комкуемостью рудо-угольной шихты, крупностью твердого восстановителя, его ценой, удаленностью от места потребления и т.д. Поэтому вопросу использования твердого восстановителя для повышения качества окатышей посвящено большое количество работ, сделать полный обзор которых весьма затруднительно.

Для улучшения структуры окатышей наиболее перспективен ввод твердого топлива в шихту при их изготовлении. Обжиг окатышей с вводом в шихту около 1 % твердого топлива осуществим без значительных капитальных затрат; усложняется лишь организация складирования, дозирование топлива и транспортирование к известняку для совместного складирования.

Наиболее универсальным видом окатышей, пригодным для термообработки по известным технологическим схемам, являются окатыши с равномерным распределением топлива. Такой метод получения окатышей из гематитового концентрата достаточно широко используется на практике. Причем содержание углерода в шихте редко превышает 1,0 %.

При обжиге рудо-угольных окатышей в окислительной среде преимущественное развитие получает двухступенчатая схема [86]. Это обусловлено диффузионными затруднениями проникновения кислорода с поверхности вглубь окатыша, связанными как с малым размером пор окатыша (не более 10 мкм), так и противодействием, создаваемым выходящими из окатыша газами ($\text{CO} + \text{CO}_2$). Согласно данному положению, доля углерода, окисляемая кислородом газовой фазы, должна зависеть от парциального давления кислорода, диаметра окатышей и скорости "выгорания" углерода (исходного его содержания) [54].

При любых содержаниях углерода в шихте его доля, идущая на восстановление, достаточно велика. В целом, процесс восстановления, протекающий в окатышах при окислительном обжиге, "вреден" с теплотехнической точки зрения. Во-первых, он протекает в зонах нагрева и обжига с потреблением теплоты, что снижает интенсивность теплообмена (хотя суммарный тепловой эффект от "выгорания" углерода – положительный). Во-вторых, вторичное окисление восстановленных фаз протекает преимущественно в зоне охлаждения, что снижает эффективность её работы.

Температура газа в слое при нагреве зависит от соотношения внутреннего источника теплоты (количества выгоревшего углерода) и теплосодержания фильтруемых газов. При определенном соотношении температура газов может увеличиться на 150 – 170 °С выше температуры обжига, что ведет к образованию спеков. Чтобы не образовывался спек, это соотношение не должно превышать 0,14 – 0,15, то есть чем выше скорость фильтрации и ниже температура обжига, тем больше твердого топлива можно подать в слой.

В зоне охлаждения при определенных условиях (пониженных скоростях фильтрации, сравнительно высокой степени восстановления, которая пропорциональна расходу углерода) может наступить явление саморазогрева слоя, когда температура

фильтруемых газов превысит начальную температуру слоя, что также может привести к спекообразованию.

При обжиге магнетитового сырья необходимо максимально полно и своевременно использовать внутренний источник теплоты от окисления (до 40 % в общем балансе прихода теплоты). Запуск механизма окисления уже в зоне нагрева и окончание этого процесса до начала стадии охлаждения окатышей позволяет снизить потребность в теплоте от внешнего источника (топлива) в зоне обжига и повысить эффективность процесса охлаждения [55]. Требуемые условия обеспечиваются специальным разработанным для конкретного перерабатываемого сырья режимом термообработки. Специальный режим термообработки реализуется за счет оригинальных конструкций горнов и газопроводов обжиговой машины. В результате выполнения данного аспекта достигается минимальный расход топлива.

При обжиге окатышей из гематитовых концентратов с добавками твердого топлива, роль кинетики выгорания углерода столь же важна, как и кинетика окисления 2-х валентного железа для магнетитовых окатышей [56]. Поэтому запуск механизма горения твердого топлива уже в зоне нагрева и окончание этого процесса до начала стадии охлаждения окатышей позволяет снизить потребность в теплоте от внешнего источника (топлива) в зоне обжига и повысить эффективность процесса охлаждения.

Таким образом, задачей зоны нагрева является обеспечение в них планомерного подъема температуры настолько быстрого, чтобы как можно раньше прогреть материал до начала процесса горения твердого топлива, но без опасности шокового разрушения окатышей.

Сложность выполнения такой задачи заключается в том, что у окатышей из гематитового концентрата пониженная (в сравнении с окатышами из магнетитового концентрата) температура шокового разрушения. Однако, опасность шокового разрушения тем меньше, чем меньше влажность окатышей.

Таким образом, для максимальной интенсификации процесса горения твердого топлива необходимо закончить процесс сушки окатышей в пределах зоны сушки.

Некоторые особенности применения гематитового концентрата при получении окатышей для металлизации

Наиболее важными параметрами качества окатышей для металлизации служат:

1. содержание железа и пустой породы;
2. окисленность;
3. прочность.

Разницу в соотношении содержания железа и пустой породы при использовании гематитовых и магнетитовых концентратов иллюстрирует таблица 1.1 [68]:

Таблица 1.1 – Соотношении содержания железа и пустой породы при использовании гематитовых и магнетитовых концентратов

Концентрат	Содержание Fe общего, %	Содержание оксидов железа, %	Содержание пустой породы, %
Магнетит	69,00	95,3	4,7
Гематит	66,71	95,3	4,7
Магнетит	70,00	96,7	3,3
Гематит	67,69	96,7	3,3

Из представленных данных видно, что гематитовый концентрат с более низким содержанием железа может дать продукт равного качества с магнетитовым, но содержащим более высокую долю железа. Это означает, что окисленные концентраты возможно и нет необходимости обогащать до содержания железа 69 - 70%.

Окисленность – важный показатель качества, т.к. от нее зависит весь процесс восстановления. Для окатышей, загружаемых в шахтную печь, содержание FeO должно быть не более 0,5%, а лучше – не более 0,1%. Доменные окатыши могут иметь и 1,5% FeO и больше.

В целом, с точки зрения возможности получения окатышей для металлизации из гематитовых концентратов, нужно иметь ввиду:

1. При равном содержании общего железа в гематитовом концентрате и магнетитовом, гематит по качеству лучше, т.к. после восстановления содержит больше железа в единице массы. Соответственно, выход шлака в электроплавке будет меньше и производительность ДСП – выше.
2. Производство окатышей для металлизации из магнетитовых концентратов (после дообогащения) на МГОК потребует снижения производительности на 20-25% для обеспечения необходимого уровня окисленности.
3. При использовании гематитовых концентратов повысятся удельные расходы энергоресурсов и немного снизится производительность (5-10%).
4. При производстве окатышей для металлизации на МГОК более предпочтительно использовать гематитовые концентраты, чем магнетитовые, т.к. производительность ОМ будет выше (при условии получения нормальных сырых окатышей).

Одним из эффективных параметров, позволяющих регулировать процесс окомкования и способствующей повышению прочности сырых окатышей, является размер зерен железорудного концентрата (удельная поверхность), а для интенсификации развития тепло-массообменных процессов при обжиге окатышей в условиях перекрестной схемы теплообмена на конвейерной обжиговой машине предлагается использовать добавки твердого топлива. В лабораторных условиях установлено [57], для получения с сырых окатышей, характеризующихся высокими прочностными показателями, необходимо чтобы удельная поверхность концентрата была не ниже 1500 см²/г.

Из выше изложенного целесообразно выделить основные проблемы при производстве окатышей из гематитового концентрата:

1. Недостаток количества теплоты от окисления магнетита.
2. Удельная поверхность концентрата должна быть не менее 1500 см²/г.
3. Затруднительный процесс окомкования гематитовых концентратов.

4. Для термообработки гематитовых окатышей необходимы особые температурно-временные режимы.

Расчетное замещение углеродом снижения начального содержания FeO в окатышах

В Российской Федерации и странах СНГ отсутствует промышленный опыт термообработки окатышей из гематитовых концентратов. В 1976-1979 годах специалистами ВНИИМТ и УЭЧМ (УралЭнергоЧерМет) были реализованы расчеты (балансовым методом) параметров работы ОКМ-520 при обжиге окатышей с содержанием FeO 2-8%. Данные расчеты показали, что при обжиге таких окатышей без использования углерода удельный расход природного газа может достигать 35-50 м³/т в зависимости от режима термообработки и степени офлюсования окатышей. Введение в шихту углерода в количестве 0,5% должно привести к снижению удельного расхода природного газа на 8-14% при увеличении производительности обжиговой машины на 10-20%. Применительно к условиям предприятий Украины делались попытки использования добавок углей в шихту окатышей из магнетитовых концентратов с целью снижения расхода природного газа. Таким образом, в 1982г. были реализованы опытно-промышленные исследования на ОКМ-135 ЦГОКа с добавлением 1% угля в шихту, что поспособствовало снижению удельного расхода природного газа на 26% [58]. По расчетам ВНИИМТ и УЭЧМ снижение удельного расхода природного газа должно было составить 16,5%, но при увеличении производительности машины на 11%. На ОКМ-278 в 1990 году были проведены опытно-промышленные испытания с добавкой углерода в шихту окатышей. Целью было получение обожженных окатышей с остаточным углеродом, поэтому содержание углерода в шихте было повышено до 2,5%. В результате было выявлено, что при этих условиях снижение удельного расхода газа составило 10%, но при уменьшении производительности обжиговой машины на 20% и увеличении удельного расхода электроэнергии на 27%. При этом было выявлено значительное увеличение содержания FeO в обожженных окатышах с 2,0 до 11,7% и рост температуры окатышей на разгрузке более чем 200°C.

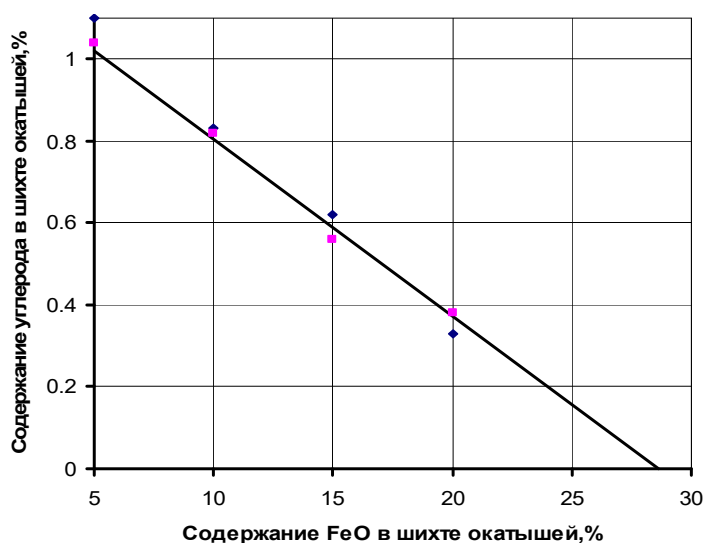
Рассмотренные выше данные дают некоторое представление о влиянии углерода в шихте окатышей на результаты термообработки, но не отражают количественных характеристик этой технологии обжига. Поэтому были реализованы расчетные исследования на математической модели ООО НПВП ТОРЭКС», о результатах которых изложено ниже.

В качестве объекта моделирования была выбрана обжиговая машина ОК-306 Лебединского ГОКа. Базовым режимом был рассчитан вариант работы машины на магнетитовых неофлюсованных окатышах с содержанием железа 67,7% и FeO = 28,6% при удельной производительности (по обожженным окатышам) 1,1 т/ч·м². По расчетам, удельный расход природного газа составил 14,9 м³/т, что практически совпадает с фактическими показателями. Далее осуществляли расчеты показателей работы машины на окатышах с пониженным содержанием FeO до 20, 15, 10 и 5% и с подбором величины добавки в шихту углерода таким образом, чтобы при любом составе шихты средняя по высоте слоя прочность обожженных окатышей (σ) или максимальная температура окатышей на границе слой - постель ($t_{c/п}$) оставались неизменными. При этом учитывалось, что при наличии углерода в окатышах скорость их окисления снижается, как это было показано в исследованиях к.т.н. В.И. Клейна [59]. Постоянными сохранялись:

производительность машины по сырым окатышам и скорость фильтрации теплоносителя в зонах нагрева, обжига и рекуперации.

На рисунке 1.6 представлены результаты расчетов на математической модели в виде зависимости подобранного, т.е. необходимого содержания углерода от начального содержания FeO в окатышах. Здесь же проведена прямая линия, полученная по справочным данным [60, 61], исходя из равенства тепловых эффектов на единицу массы от горения углерода и окисления FeO.

Таким образом, по расчетам математической модели выявили, что одинаковое качество обжига слоя окатышей достигается в случае стехиометрического замещения углеродом (по теплоте) уменьшения содержания FeO в окатышах. При этом удельный расход природного газа изменяется нелинейно.



◆ - результаты моделирования при $t_{c/n} = \text{const}$;

■ - результаты моделирования при $\sigma = \text{const}$.

Рисунок 1.6 – Расчетное замещение углеродом снижения начального содержания FeO в окатышах.

Как видно из рисунка 1.7, при меньшем начальном содержании FeO в окатышах, т.е. при уменьшении тепловыделения в слое за счет окисления 2-валентного железа, но с соответствующей тепловой компенсацией добавкой углерода, удельный расход природного газа заметно снижается. Причины данного явления видны на графиках рисунка 1.8.

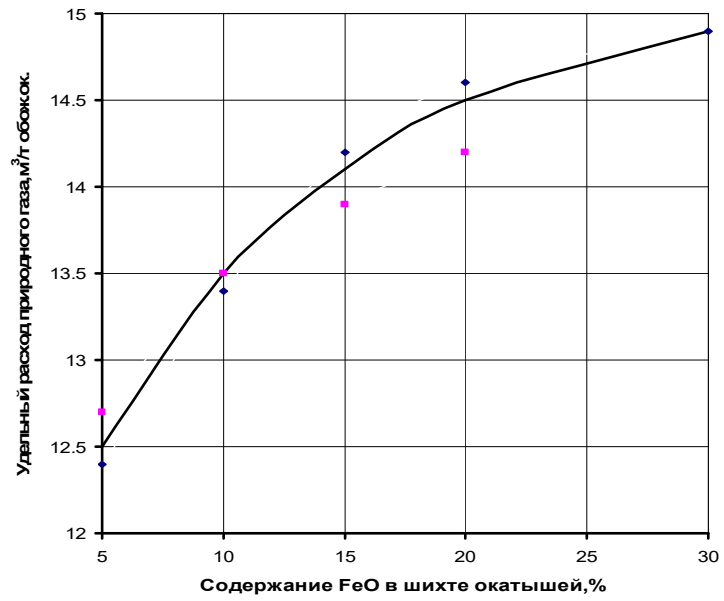
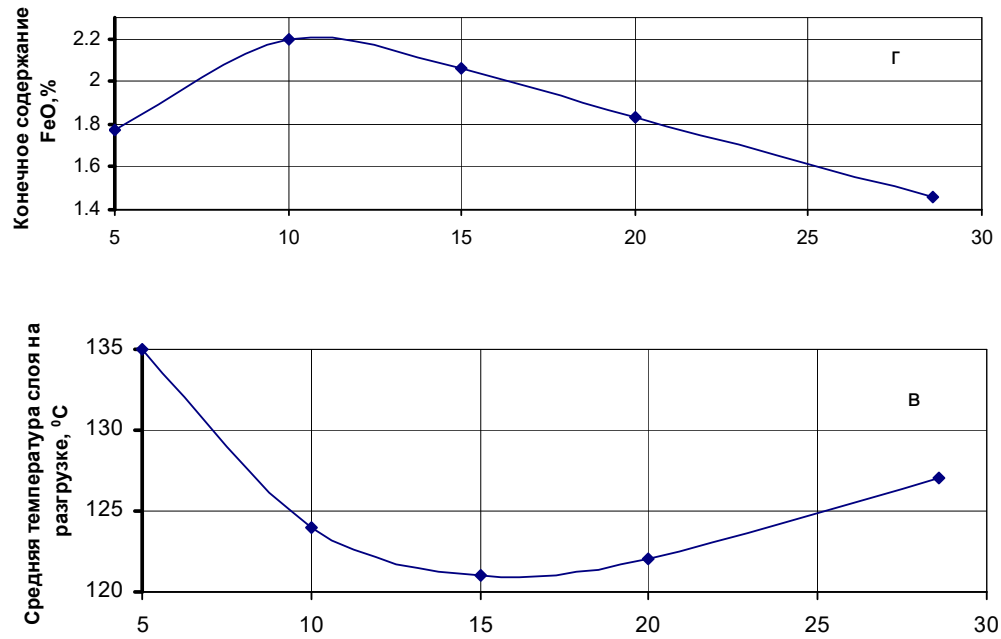


Рисунок 1.7 – Расчетный удельный расход природного газа при снижении начального содержания FeO в окатышах с компенсацией углеродом (обозначения точек на рис. 1.6)



Начало рисунка 1.8

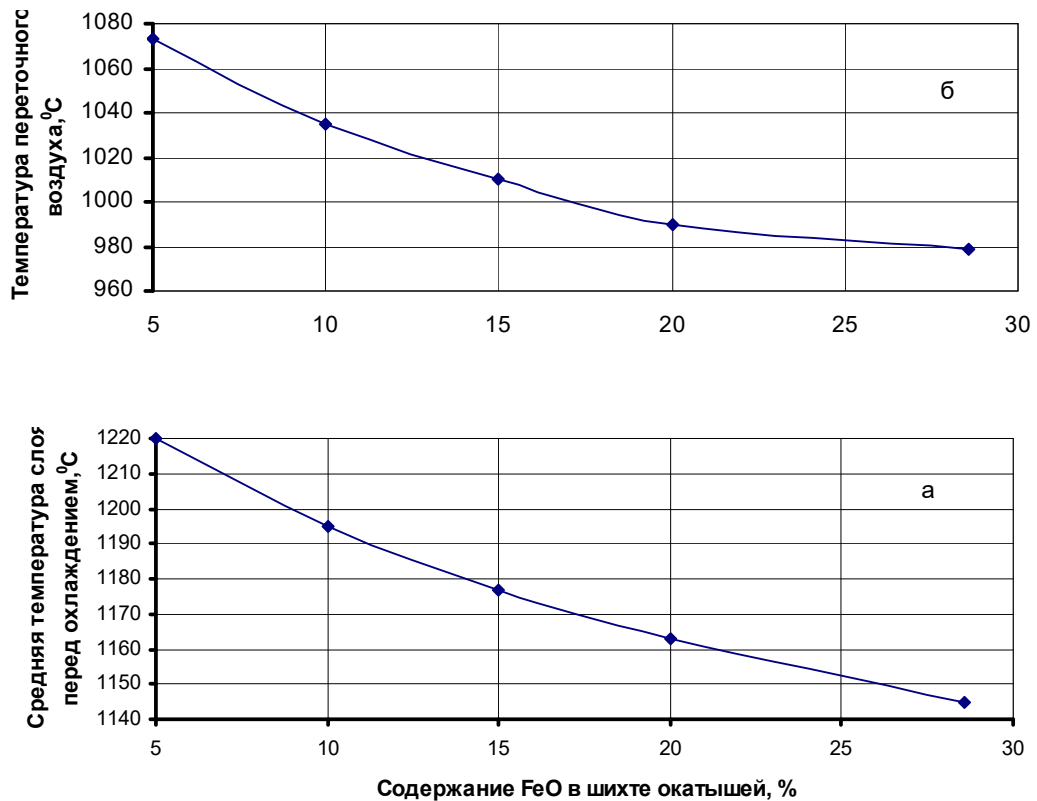


Рисунок 1.8 – Изменение теплового состояния слоя при снижении начального содержания FeO в окатышах (с компенсацией углеродом)

Для поддержания постоянной прочности окатышей и требуемого прогрева низа слоя необходимое количество углерода в окатышах приводит к усилению прогрева слоя в целом (рис. 1.8а). Это в свою очередь приводит к повышению температуры переточного воздуха (рис. 1.8б), следствием чего и является снижение удельного расхода природного газа при заданном температурном режиме горна машины.

Следует заметить, что эти результаты получены при определенной реакционной способности твердого углерода, которая может существенно изменяться в зависимости от вида используемого твердого топлива (коксик, антрацит, энергетический или бурый уголь). Однако дополнительные расчеты с уменьшением и увеличением эффективной константы скорости горения углерода в 2 раза показали, что тепловая работа слоя при этом изменяется очень немного. Так, средняя температура слоя после зоны рекуперации и температура переточного воздуха изменяются в пределах $\pm 5^{\circ}\text{C}$, а удельный расход природного газа изменяется в пределах $\pm 0,1\text{ м}^3/\text{т}$.

Следовательно, более важным фактором является распределение углерода в объеме окатыша. Твердое топливо можно накачивать на поверхность сырого окатыша и в этом случае углерод будет выгорать как в чисто топливном слое с максимальным значением как эффективной константы скорости реакции, так и величины кажущейся энергии активации (порядка 40 ккал/моль = 167 кДж/моль). При этом торможение окисления магнетита в период выгорания углерода будет также максимальным. Если углерод распределить равномерно в объеме окатыша за счет подачи топлива в шихту перед смешением, процесс

выгорания углерода сместится в диффузионную область с понижением его эффективности и уменьшением кажущейся энергии активации. Так, например, по данным опытов к.т.н. В.И. Клейна [59] с двухслойными рудоугольными окатышами диаметром 12 мм, в которых весь углерод находился в ядре диаметром 8 мм, кажущаяся энергия активации составляла около 6,5 ккал/моль = 27,2 кДж/моль. Модельные расчеты показали, что снижение кажущейся энергии активации, например, в 4 раза (от 40 ккал/моль) приводит к существенному (на 10м) сдвигу максимума скорости выгорания углерода в сторону зоны охлаждения и снижению прогрева низа слоя.

Следовательно, наиболее эффективным способом добавки углерода в окатыши является введение топлива в приповерхностную область окатышей, поскольку накатывание топлива тонким слоем на поверхность сырых окатышей может привести к образованию спеков. Но необходимо отметить, что ведение топлива в приповерхностную область окатышей в реальном производстве практически не осуществимо, поэтому самым эффективным является добавка твердого топлива в шихту на этапе перемешивания шихтовых компонентов. Подбор рационального соотношения способа ввода топлива в шихту и его реакционной способности позволит оптимизировать положение области максимального тепловыделения при горении углерода по длине машины и добиться наилучшего прогрева низа слоя.

По поводу добавок углерода в шихту магнетитовых окатышей отметим следующее. Экономия природного газа, конечно, может быть при этом достигнута, особенно при снижении максимальной температуры в горне. Однако в этом случае всегда наблюдается рост содержания FeO в обожженных окатышах за счет большей их оплавленности и максимальное содержание углерода в окатышах не может превышать 1% для обеспечения приемлемого качества окатышей для доменных печей. Кроме того, введение в состав шихты окатышей твердого топлива, содержащего минеральную золу и летучие, неизбежно, и не всегда положительно скажется на прочности, структуре, характере пористости и химическом составе обожженных окатышей.

1.3 Некоторые характеристики опыта производства обожженных окатышей из гематитового концентрата в России и за рубежом

Исследование металлургических свойств окатышей из гематитовой руды Большетроицкого месторождения

Рассмотрены результаты исследования окатышей из гематитовой руды Большетроицкого месторождения, полученных в лабораторном окомкователе и обожженных в условиях, аналогичных режиму обжига верха слоя на действующей обжиговой машине ОАО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева» [67, 68]. В ходе исследований сравнивались свойства окатышей гематитовой руды Большетроицкого месторождения (пробы №1–4) с окатышами из рядового концентрата ОАО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева» (проба №0). Состав, свойства и результаты исследований использованных окатышей приведены в таблице 1.2. Поскольку в гематитовых окатышах менее выражен внутренний источник теплоты от окисления FeO, а обжиг окатышей проводили в идентичных условиях, в пробы окатышей №1–4 был добавлен измельченный коксик. Это позволило обеспечить сопоставимые тепловые условия обжига окатышей из концентратов разного типа.

Таблица 1.2 – Характеристики исследованных окатышей

Номер пробы	Расход, %		Удельная поверхность, см ² /г	Химический состав обожженных окатышей, %				Константа скорости восстановления		Прочность на сжатие, кг/ок	"Горячая" прочность, кг/ок	
	Бентонит	Коксик		Fe	FeO	CaO	SiO ₂	700°С	900°С		700°С	900°С
0	0,6		1658	62,9	0,97	0,8	8,7	0,58	0,67	296	180	125
1	0,7	1	969	68,3	1,87	0,3	0,6	0,36	0,48	221	25	13
2			1233	68,1	1,84	0,3	0,5	0,3	0,58	203	24	11
3			1593	68,2	1,6	0,3	0,6	0,36	0,74	170	71	15
4			1784	68,4	1,6	0,3	0,5	0,37	0,59	174	56	27

По металлургическим свойствам окатыши из гематитовых и магнетитовых руд имеют значительные различия. При этом по содержанию общего железа окатыши из исследованной гематитовой руды превосходят магнетитовые окатыши, а по отдельным («горячая» и «холодная» прочности) наблюдается обратная картина. Относительно низкие показатели прочности окатышей из гематитовой руды связаны с особенностями ее минерального состава, что обуславливает формирование в окатышах малое количество силикатной связки и соответственно значительное разупрочнение под действием внутренних напряжений, возникающих при восстановлении оксидов железа.

Производство окатышей из гематитового концентрата в Индии

Опыт использования гематитового концентрата имеется в Индии на обжиговой машине МОК-189, площадью 189 м². Годовое производство доменных офлюсованных окатышей основностью (CaO/SiO₂) равной 0,3 – 1,2 млн. т. Концентрат гематитовый, сернистый, удельная поверхность – 1800-2200 см²/г. Химический состав и дозировки шихтовых материалов представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Химический состав и дозировки шихтовых материалов (на сухую массу)

Компоненты шихты	Количество, кг/т	Массовая доля соединения в компоненте, %											
		Fe _{обш}	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	S	C	ппп	Проч.
Концентрат	923,2	64,0		91,43	3,0	-	3,0	-	-	0,15	-	2,42	-
Бентонит	7,2	-	-	59,8	2,0	21,0	3,1	-	-	-	-	14,12	-
Флюс	15,7	-	-	-	5,0	48,0	2,0	3,5	-	-	-	41,5	-
Коксовая мелочь	13,9	-	-	1,5	6,0	1,5	2,5	1,0	-	-	86,0	1,5	-

Производство окатышей из гематитового концентрата в Бразилии

Опыт производства окатышей из гематитового концентрата также имеется в Бразилии. Компания VALE использует гематитовый концентрат при производстве обожженных окатышей на обжиговой машине площадью 480 м². Производительность ОМ по сырым окатышам 642,4 т/ч. Химический состав шихтовых материалов представлен в таблице 1.4, а материальный баланс окомкования и обжига в таблице 1.5.

Таблица 1.4 – Химический состав шихтовых материалов (% на сухую массу)

	Fe _{общ}	Fe ₂ O ₃	C	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	Mn	S	P	H ₂ O	П.п.п.	проч.
Концентрат	68.13	97.33	0.00	0.94	0.34	0.03	0.49	0.07	0.01	0.03		0.417	0.35
Антрацит	0.00	0.00	74.00	16.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		10.000	0.000
Бентонит	11.3	16.14	0.000	51.00	15.70	0.00	0.00	0.17	0.00	0.08		7.38	9.527

Таблица 1.5 – Материальный баланс процессов окомкования и обжига окатышей

Компонент шихты	Всего в шихте, кг вл	Содержание соединения в компоненте, кг на тонну влажной шихты												
		Fe _{общ}	Fe ₂ O _{3г}	C	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	Mn	S	P	H ₂ O	П.п.п.	проч.
Концентрат	979.43	610.38	871.97	0.00	8.42	3.05	0.27	4.39	0.61	0.045	0.269	83.53	3.74	3.146
Антрацит	13.27	0.00	0.0	9.63	2.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.27	1.30	0.000
Известняк	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.00	0.00	0.000
Бентонит	7.22	0.73	1.0	0.00	3.28	1.01	0.00	0.00	0.01	0.000	0.005	0.80	0.47	0.6
Вода	0.07											0.07		
Сырые окатыши	1000	611.1	873.0	9.63	13.78	4.05	0.27	4.39	0.62	0.045	0.274	84.67	5.51	3.76
		61.11	87.30	0.96	1.38	0.41	0.03	0.44	0.06	0.004	0.027	8.47	0.55	0.38
		66.76	95.38	1.05	1.51	0.44	0.03	0.48	0.07	0.00	0.03		0.60	0.41
Обжиг				-100.0								-40		-100
	-99.82			-9.626								-0.0179		-84.67
Обоженные окатыши	900.18	611.10	873.01	0.00	13.78	4.05	0.27	4.39	0.62	0.027	0.27	0.00	0.00	3.76
	100.00	67.89	96.98	0.00	1.53	0.45	0.03	0.49	0.07	0.0030	0.03	0.00	0.00	0.42

Производство окатышей из гематитового концентрата в Канаде

Проектная производительность фабрики составляет 6 млн.т./год (с двух машин), фактически достигнутая в настоящее время – 10 млн.т./год.

Концентрат гематитовый, содержание оксида кремния составляет порядка 4,8%. После гравитационного обогащения добиваются снижения до 1,8%. Содержание железа в хвостах 9 %. Концентрат поступает железнодорожным транспортом, принадлежащим компании ArcelorMittal, после предварительного обогащения в руднике. Влажность составляет около 3-3,5 %, крупность $d_{80} = 600$ мкм

В шихту окатышей производится добавка доломита, известняка, бентонита и коксовой мелочи. Используется активированный греческий бентонит. Бентонит разгружается с судна и подается автотранспортом на сушку и измельчение в молотковую мельницу. Измельченный бентонит посылается в смеситель. Для активации ионов, дезактивированных водой при гравитационном обогащении, применяют гидроксид натрия – NaOH, который подается напрямую в смеситель. Химический состав гематитовых окатышей представлен в таблице 1.6.

Таблица 1.6 – Химический состав окатышей

Fe _{общ}	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	MnO	S _{общ.}	C _{общ.}	P ₂ O ₅	nnn	K ₂ O	Na ₂ O
67,8	1,86	1,63	0,39	0,83	0,24	0,16	0,03	0,003	0,05	0,018	0,2	0,02	0,03

При приготовлении шихты также используются известняк и доломит. Известняк используется для офлюсования доменных окатышей, а доломит для регулирования

содержания магния в окатышах для металлизации. Экспериментов по замещению известью бентонита не проводили.

Внутри цеха установлен бункер для органического связующего. Пневматическим транспортером (муковоз) и пневмотранспортом органический полимер подается в смеситель. Полимер применяется на линии №1, при производстве DRI, когда имеется необходимость снижения содержания кремния в окатышах. Это связано с работой гравитационного обогащения - применяется при плохом коэффициенте разделения сред кремния и железа.

На первой мельнице установлены различные питатели для известняка, доломита, кокса, концентрата. Производится совместное мокрое измельчение. После циклонов хвосты отправляются в хвостохранилище, а пульпа с содержанием твердого 72%, подается через перемешиватели пульпы на фильтрацию.

Влажность концентрата после вакуумных фильтров составляет 8,6%. Расход бентонита 6-7 кг/т, при использовании полимера – 1-2 кг/т. Расход полимера Флоформ 3049S производства SNF составляет 300 г/т (Флоформ 1049 применялся на ЛГОКе). Полимер добавляется при ухудшении работы гравитационного обогащения. Верхнее предельное содержание кремния ограничено заказчиками до 1,8%.

Таким образом, необходимо отметить, что концентраты различных месторождений имеют различный состав и свойства. Зарубежные гематитовые концентраты имеют отличные друг от друга и от Российских месторождений свойства и особенности и различные методы обогащения. Концентрат ОЖК Михайловского месторождения требует исследований свойств и состава. И особенно важным являются исследования концентрата ОЖК Михайловского месторождения на предмет получения сырых и обожженных окатышей, с учетом особенностей данного концентрата и разработки рекомендаций для промышленного внедрения концентрата ОЖК, с целью производства конкурентоспособных окатышей.

1.4. Обогащение руд окисленных железистых кварцитов (ОЖК) Михайловского месторождения

Вовлечение в переработку ОЖК попутной добычи является наиболее перспективным и экономичным источником роста производства концентратов без увеличения объема добычи магнетитовых руд [3]. При этом исключается потребность в дополнительной площади для складирования руды и, соответственно, улучшается экологическая обстановка в районе добычи. Однако решение данной задачи сдерживалось отсутствием эффективной апробированной технологии обогащения ОЖК, окомкования полученных концентратов, и отсутствием разработок параметров производства обожженных окатышей ОЖК.

Обогащению руд посвящено достаточно работ [104-106]. На основании анализа предшествующих исследований по магнитному и флотационному обогащению руд Михайловского месторождения и данных по изучению их вещественного состава, а также ознакомления с опытом работы зарубежных обогатительных фабрик, в 2011 году с привлечением компании «Outotec» разработан технологический регламент по проекту «Производство концентрата в объеме 10 млн. тонн из окисленных кварцитов Михайловского месторождения». В основу регламента была заложена схема с применением

низкоинтенсивной и высокоинтенсивной магнитной сепарации, а также обратной катионной флотации.

Для подтверждения возможности получения концентрата из ОЖК в промышленных условиях и определения технико-экономических показателей их обогащения в 2014-2015гг. на секции №14 ДОК АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева» инициировал промышленные испытания.

При подготовке к испытаниям выполнены следующие работы:

- реконструирована технологическая секция №14 ДОК с изменением технологических потоков, установкой нового насосного оборудования и высокочастотных грохотов модели HDS 612 компании «Коралайна Инжиниринг»;
- построен корпус высокоинтенсивной сепарации (ВИМС), в котором установлены 3 высокоинтенсивных магнитных сепаратора разных фирм производителей: «Eriez Maqnetich Europe Ltd» (Англия), «Outotec» (Финляндия), «Oy Lonqi Magnet Co» (Китай);
- модернизированы конвейерные тракты участка склада концентрата;
- адаптирована схема цепи аппаратов обратной катионной флотации с использованием машин колонного типа для обогащения ОЖК;
- приобретены новые реагенты марки Лилафлот.

С целью проведения испытаний были сформированы на перегрузочных пунктах и поданы на ДОК опытные партии ОЖК:

- руда Центрального участка карьера (100%);
- руда Южного участка карьера (100%);
- смесь руд Южного и Центрального участков карьера в соотношении 1:1.

Добиться качества железорудного концентрата с массовой долей железа общего 66,0% и диоксида кремния 5% удалось при переработке ОЖК из Центральной части карьера. При обогащении ОЖК из Южной части карьера качество получаемого концентрата по содержанию железа было значительно ниже – 62,9%. При работе на смеси руд Центрального и Южного частей карьера в массовом соотношении 1:1 качество получаемого железорудного концентрата было на уровне 63,6%. Во всех промышленных экспериментах извлечение железа находилось на уровне 54%. Из окисленной руды с содержанием общего железа 40,7% и магнетитового 8,14% было произведено 96,3 тыс. тонн концентрата с массовой долей железа 64,7%.

Результаты испытаний показали принципиальную возможность промышленного получения высококачественного гематитового концентрата из ОЖК [69], что подтвердили минералогические исследования (рисунок 1.9). Однако извлечение железа в концентрате оказалось низким и зафиксированы большие потери железа с хвостами. При этом установлено, что технологические показатели обогащения ОЖК с различных участков карьера существенно отличаются. Подробный анализ исходного сырья и продуктов обогащения ОЖК, проведенный с привлечением ряда сотрудников исследовательских институтов, позволил выявить некоторые направления повышения эффективности обогащения окисленных кварцитов за счет использования более эффективных реагентов, применения физических воздействий и новых схем флотации. Для повышения показателей обогащения ОЖК исследования были продолжены в направлении развития флотационной технологии.

На основании результатов многочисленных исследований специалистами ООО УК «МЕТАЛЛОИНВЕСТ» и АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева» с привлечением ученых научно-исследовательских институтов была разработана схема флотационного обогащения ОЖК, вобравшая в себя лучшие технологические решения.

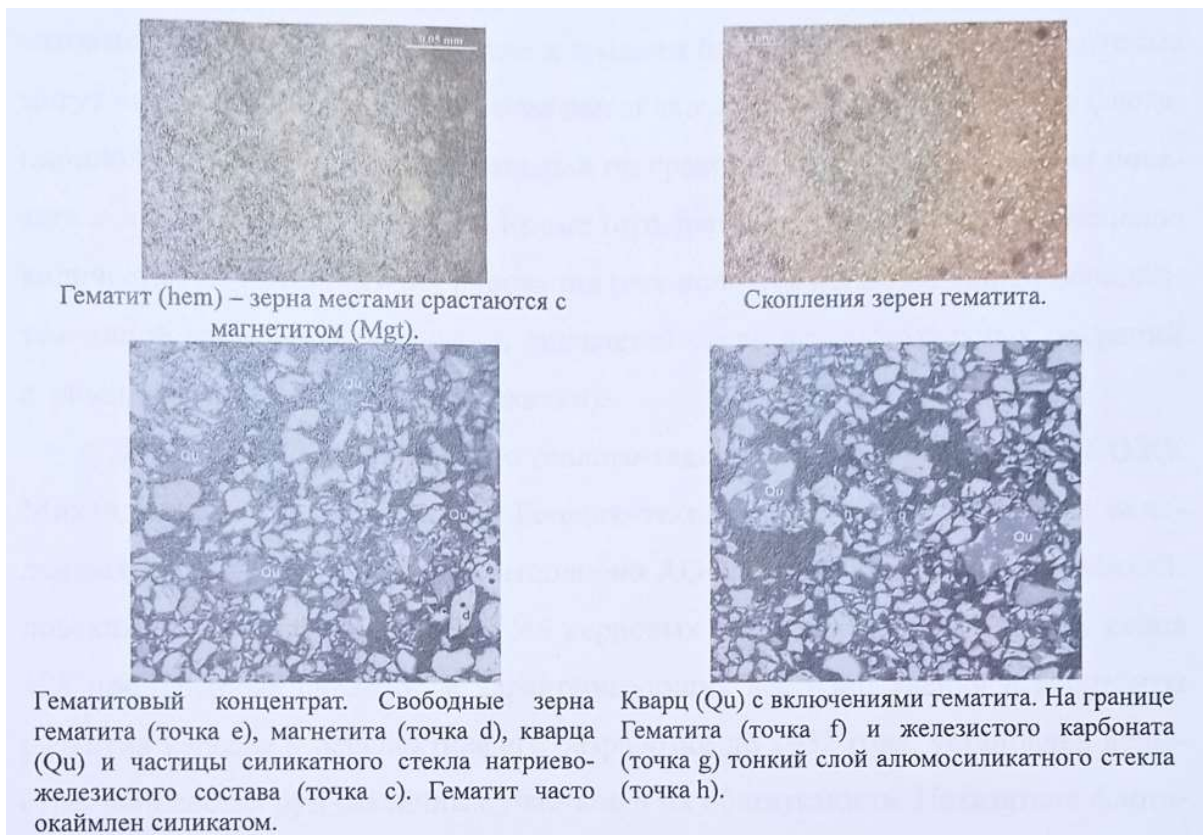


Рисунок 1.9 – Морфология выделений минералов в гематитовом концентрате

Технологическая схема включает измельчение до крупности – 97% класса минус 44 мкм, раздельное обогащение магнетитовой и гематитовой части ОЖК после разделения мокрой магнитной сепарацией в слабом поле. Гематитовая часть обогащения флотационным методом с применением собирателя марки Лилафлот и операции предварительной механоактивации гематита.

Проведенные лабораторные испытания показали высокую эффективность разработанной флотационной схемы обогащения окисленной части железистых кварцитов по сравнению с ранее предложенной схемой их обогащения высокоинтенсивной магнитной сепарацией.

Флотационная схема имеет очевидные технологические преимущества. Обогащение окисленной части руды по данной схеме позволило получить гематитовые концентраты, содержащие в среднем 66,6% FeO и 2,06% SiO₂, которые могут использоваться для получения высококачественных окатышей. По флотационной схеме получен максимальный по сравнению с другими схемами показатель извлечения железа – 70%. Кроме того, данная схема требует минимальное количество разнотипного оборудования

(исключается использование высокоинтенсивной магнитной сепарации, снижается число вспомогательных операций сгущения пульпы и узлов ее перекачки).

Для расчета ТЭО проведено геолого-технологическое картирование ОЖК Михайловского месторождения. Геолого-технологическое картирование окисленных железистых кварцитов выполнено АО УГРК «Уранцветмет» и Михайловским ГОКом, на материале 3746 керновых проб, сформированных из керна 128 пробуренных скважин, и характеризующих все направления и горизонты развития карьера в перспективе его разработки до 2032 года, установлен вещественный состав руд различных участков и их обогатимость. Показатели флотационного обогащения определены для 3238 проб.

Вещественный состав руд изучали комплексом современных методов: оптическая и электронная микроскопия, оптико-геометрический, химический, рентгеноструктурный и рентгеноспектральный анализ, магнитная сепарация, флотация и др.

В результате выполненных исследований по геолого-технологическому картированию, окисленные железистые кварциты Михайловского месторождения классифицировали на сорта по их обогатимости. За основной критерий разделения ОЖК на технологические сорта принят показатель массовой доли общего железа в камерном продукте обратной катионной флотации (флотационная обогатимость). В соответствии с принятым критерием выделено три технологических сорта окисленных железистых кварцитов:

- Труднообогатимый (ТО) – обогатимость менее 65%;
- Среднеобогатимый (СО) – обогатимость 65-67%;
- Легкообогатимый (ЛО) – обогатимость более 67%.

Кроме того, получена блочная модель залегания окисленных железистых кварцитов по технологическим сортам (рисунок 1.10).

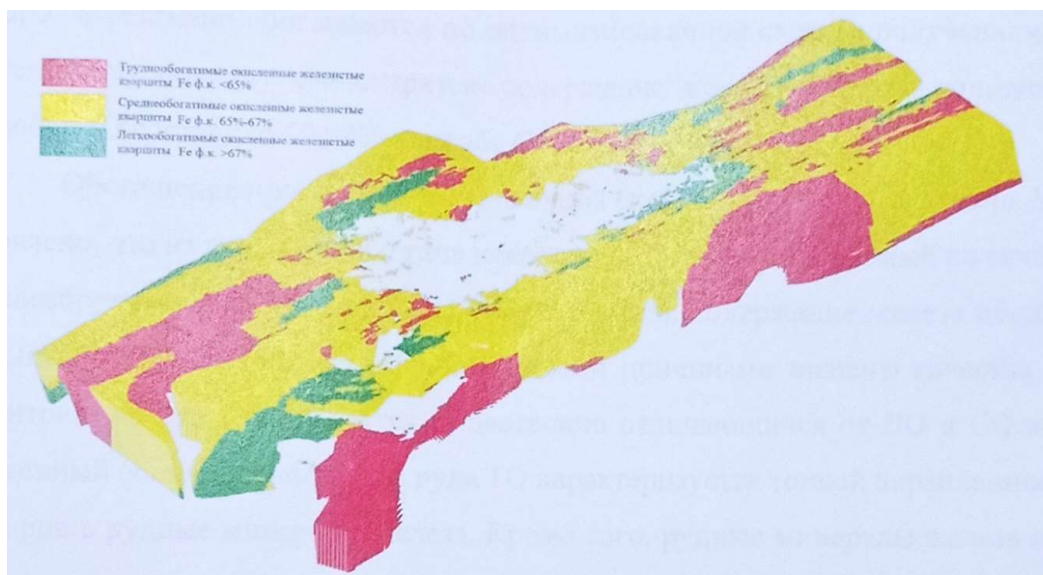


Рисунок 1.10 – Блочная модель залегания окисленных железистых кварцитов по технологическим сортам

С целью проверки эффективности, предложенной АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева» схемы обогащения ОЖК и, при необходимости, ее оптимизации для получения концентратов заданного качества, в 2018 году независимой компетентной лабораторией

ООО НИИПИ «ТОМС» выполнены технологические исследования окисленных железистых кварцитов Михайловского месторождения.

На пробах СО, ЛО, ТО исследовалась обогатимость руды по магнитно-флотационной схеме обогащения ОЖК, предложенной МГОКом, с целью определения ее эффективности и при необходимости, оптимизации для получения концентрата заданного качества. В результате выполненных исследований, технологическая схема МГОКа была оптимизирована: скорректирован в сторону уменьшения расход реагентов – декстрина и амина, уточнено время флотации по операциям на оптимальном реагентном режиме, исключена одна операция механоактивации – в качестве механоактивации на основании опытов было принято решение использовать ультратонкое измельчение, уменьшено количество контрольных операций промпродуктового цикла, исключен возврат в схему объединенного концентрата контрольных операций промпродуктового цикла.

Анализ полученных результатов позволил заключить, что пробы руды СО и ЛО эффективно обогащаются по оптимизированной схеме с получением требуемых по качеству концентратов: содержание железа общего в концентрате пробы ЛО составило 69,88%, в пробе СО – 67,38%.

Обогащение пробы ТО по аналогичной схеме прошло неэффективно. Установлено, что из руды данного типа невозможно получить требуемый по качеству железорудный концентрат (66% общего железа), содержание железа общего в концентрате составило 59,83%. Основными причинами низкого качества концентрата из ТО является существенно отличающийся от ЛО и СО вещественный состав данной руды: руда ТО характеризуется тонкой вкрапленностью кварца в рудные минералы железа. Кроме того, рудные минералы железа находятся в сложном тесном сростании с сидеритом, пиритом, железистым амфиболом, которые являются носителями железа и переходят в камерный продукт обратной катионной флотации, являясь при этом вредными примесями. По этим причинам достичь высокого качества концентрата не представляется возможным даже при низком извлечении железа в концентрат и очень тонком измельчении руды.

С учетом результатов комплекса выполненных исследований откорректирован технологический регламент на проектирование фабрики обогащения и рекомендована технологическая схема переработки окисленных железистых кварцитов Михайловского месторождения, включающая следующие основные операции:

- В рудоподготовительном цикле предусматриваются три альтернативные схемы получения материала крупностью 80% - 160мкм:
 - классическая схема стадийного дробления и измельчения дробленой руды в шаровых мельницах;
 - схема стадийного дробления, предусматривающая на последней стадии тонкое дробление руды в валковой дробилке высокого давления или роллер-пресс (технология HPGR). Дробленую руду направляют на измельчение в шаровые мельницы;
- схема самоизмельчения с последующим доизмельчением материала в шаровых мельницах:
 - процесс обогащения предусматривает стадийную магнитно-флотационную схему с доизмельчением промпродуктов и концентратов.

По результатам проведенных работ разрабатывается технико-экономическое обоснование вовлечения в переработку окисленных железистых кварцитов Михайловского

месторождения, где будет предусмотрена возможность как строительства новых мощностей по предполагаемой магнитно-флотационной технологии, так и реконструкции действующих мощностей переработки неокисленных железистых кварцитов.

Параллельно с разработкой технико-экономического обоснования коммерческой службой ООО УК «МЕТАЛЛОИНВЕСТ» инициирована большая работа, по маркетинговой оценке, с целью определения емкости рынка и направлений продаж товарной железорудной продукции МГОКа из окисленных железистых кварцитов и сравнение ценности продукции из ОЖК МГОКа и неокисленных железистых кварцитов МГОКа и ЛГОКа.

Получение концентрата из окисленных кварцитов можно смело назвать уникальным проектом для нашей страны. Он станет не только первым в России успешным опытом переработки труднообогатимого полезного ископаемого, ярким примером рационального и комплексного освоения минерального сырья, а также экологическим аспектом развития Михайловского ГОКа и региона КМА. Эту задачу на комбинате решают при сохранении экологического равновесия в регионе и разумном балансе между необходимостью промышленного роста и природоохранной деятельностью. Вовлечение в переработку ОЖК – это будущее Михайловского ГОКа.

При технологии обогащения окисленных железистых кварцитов были использованы результаты многочисленных сторонних и собственных исследований, которые явились основой выбора эффективной технологии переработки ОЖК. К дальнейшим исследованиям для уточнения технологии и разработки параметров производства окатышей ОЖК Михайловского месторождения специалистами ООО «НПВП ТОРЭКС и АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева», был принят концентрат, произведенный (в результате обогащения руд ОЖК Михайловского месторождения) организацией ООО НИИПИ «ТОМС». В таблице 1.7 представлен химический состав концентрата ОЖК. При этом данной организацией был подробно изучен вещественный состав руд всех направлений и горизонтов Михайловского месторождения, на основе которого выполнена типизация руд по технологическим свойствам и установлена корреляционная зависимость технологических параметров переработки от вещественного состава.

Таблица 1.7 – Химический состав концентрата ОЖК

	Содержание компонентов в концентрате, %																
	Fe _{общ}	FeO	Fe ₂ O ₃	Fe ₃ O ₄	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	TiO ₂	Mn	S	C	P	Na ₂ O	K ₂ O	проч	п.п.п
Концентрат ОЖК	66,12	3,98 (в составе Fe ₃ O ₄)	90,05 (из них 8,8% в составе Fe ₃ O ₄)	12,8	2,1	0,1	0,22	0,71	0,00	0,02	0,035	0,38	0,01	0,01	0,04	2,3	2,88

1.5 Выводы и задачи исследования

Изучены теоретические закономерности производства окатышей из гематитовых концентратов, результаты проведенных лабораторных исследований, зарубежный опыт производства окатышей из гематитовых руд.

В России и странах СНГ нет опыта промышленного производства обожженных окатышей из гематитового сырья, в том числе из окисленных железистых кварцитов. Производились лабораторные испытания по наработке партий окатышей из гематитового концентрата других месторождений, определялись металлургические свойства, но отсутствовали комплексные полупромышленные исследования, также не предпринимались попытки моделирования процесса обжига гематитовых окатышей с целью разработки параметров промышленного производства. Зарубежный опыт переработки гематитовых руд и производства окатышей из гематитовых концентратов на обжиговых машинах различных мощностей создает прецедент по переработке гематита в конкурентно способный продукт в Российской Федерации.

Потенциал производства гематитового концентрата из хвостов технологического процесса огромен. Помимо хвостов текущего производства (27млн. т. в год), имеются «лежалые» хвосты. В техногенном месторождении АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева» (хвостохранилище) за складировано более чем 563 млн тонн (на 2010 год) переработанных и готовых к дальнейшей переработке отходов обогатительного производства.

В 2018 году независимой компетентной лабораторией ООО НИиПИ «ТОМС» выполнены технологические исследования окисленных железистых кварцитов Михайловского месторождения. В результате была разработана эффективная технология обогащения руд ОЖК Михайловского месторождения.

Когда выявляется новое месторождение железорудного концентрата, то для его внедрения в производство абсолютно недостаточно следовать опыту уже существующих предприятий, работающих с концентратами других месторождений, так как концентраты каждого месторождения обладают своим составом и свойствами. Следовательно, для компетентного внедрения в производство того или иного нового концентрата необходим целый комплекс исследований и расчетов, выявление особенностей концентрата, особенностей наработки сырых окатышей и их термообработки, а также разработка технических и технологических решений для промышленного внедрения концентрата, с целью производства конкурентоспособных обожженных окатышей.

Целью данной работы является разработка технических и технологических решений производства окатышей на АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева» с использованием концентрата окисленных железистых кварцитов Михайловского месторождения.

Для достижения данной цели необходимо в дальнейшем решение следующих задач:

1. Исследование химического состава и физических свойств шихтовых компонентов окатышей ОЖК.
2. Исследование материальных балансов шихтовых составов и физических свойств сырых и сухих окатышей ОЖК.
3. Исследование свойств полупромышленных обожженных окатышей ОЖК.

4. Математическое моделирование процессов с целью выбора режимных параметров производства окатышей применительно к обжиговым машинам АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева».
5. Разработка технических и технологических решений производства окатышей на обжиговых машинах из концентрата окисленных железистых кварцитов.

Решение вышеизложенных задач необходимо осуществлять по следующему укрупненному алгоритму комплексных исследований, способствующих формированию технологических и технических решений производства окатышей ОЖК на обжиговых конвейерных машинах: актуализация требований к качеству и химическому составу обожженных окатышей потенциальных потребителей → исследование нового концентрата ОЖК и других шихтовых компонентов, предполагаемых к использованию в исследованиях → формирование материальных балансов окомкования и обжига окатышей ОЖК → наработка партий лабораторных сырых и сухих окатышей ОЖК → исследование лабораторных сырых и сухих окатышей ОЖК → проведение полупромышленных исследований термообработки окатышей ОЖК на действующей обжиговой машине, посредством вертикальных слоевых пробников → исследование полупромышленных обожженных окатышей ОЖК → формирование комплекса исходных данных для адаптации математической модели ООО «НПВП Торэкс» → адаптация математической модели ООО «НПВП Торэкс» на предмет термообработки окатышей ОЖК на действующих обжиговых машинах АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева» → расчеты математической модели ООО «НПВП Торэкс» с целью получения: режимных параметров производства окатышей ОЖК (при которых качество окатышей удовлетворяет потенциальным потребителям), параметров газо-воздушной смеси в газоходной системе и тяго-дутьевых устройствах, расхода природного газа и так далее → формирование технологических и технических решений по производству окатышей из окисленных железистых кварцитов Михайловского месторождения на обжиговых машинах АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева».

2 ИССЛЕДОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ШИХТОВЫХ КОМПОНЕНТОВ ОКАТЫШЕЙ ОЖК

2.1 Химический анализ и физические свойства шихтовых компонентов окатышей ОЖК.

Выбор проб концентратов и предварительная их подготовка для исследований

Независимой компетентной лабораторией ООО НИиПИ «ТОМС» для исследований был предоставлен концентрат окисленных железистых кварцитов (концентрат ОЖК) месторождения АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева». Все другие компоненты шихты предоставила лаборатория окомкования отдела технического контроля (ЛОК ОТК) АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева»; данные компоненты используются в лабораторных исследованиях и в производстве окатышей на фабрике окомкования АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева». Также, АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева» предоставил два вида концентрата: «Деррики 67% пром.» и «Деррики 70%», для исследований окатышей из смеси данных концентратов с концентратом ОЖК. Каждый из данных концентратов смешивался с концентратом ОЖК в пропорции 50/50. «Деррики 67% пром.» - магнетитовый концентрат Михайловского месторождения, полученный в результате магнитного обогащения с использованием технологии тонкого грохочения «Derrick» и содержанием железа 67%. «Деррики 70%» - магнетитовый концентрат Михайловского месторождения, полученный в результате магнитного обогащения с использованием технологии тонкого грохочения «Derrick» и дальнейшего флотационного обогащения, с содержанием железа 70%. Концентраты «Деррики 67% пром.» и «Деррики 70%» были предоставлены с целью оценки производства окатышей из смеси данных концентратов с концентратом ОЖК в соотношении 50/50% для вероятной перспективы производства как альтернативы производства окатышей из 100% концентрата ОЖК.

С целью оценки влияния частичной ликвидации гидрофобной поверхности (как результата флотационного обогащения) зерен концентрата ОЖК [45] путем его доизмельчения, на качество окатышей, было принято решения доизмельчить концентрат ОЖК и дополнительно использовать его в исследованиях. Концентрат ОЖК доизмельчали с $2500\text{см}^2/\text{г}$ до $2800\text{см}^2/\text{г}$. Под удельной поверхностью понимают суммарную поверхность твердых частиц, отнесенную к единице массы ($\text{см}^2/\text{г}$).

Доизмельчение концентрата осуществлялось в лабораторной шаровой мельнице (рисунок 2.1). Технические характеристики шаровой мельницы представлены в таблице 2.1.



Рисунок 2.1 – Лабораторная шаровая мельница

Таблица 2.1 – Техническая характеристика шаровой лабораторной мельницы

Название параметра	Величина параметра
Объем барабана, л	9
Шаровая загрузка: диаметр шаров, мм масса шаров, кг	19-25 11
Скорость вращения барабана, об/мин	65
Крупность загружаемых зерен, мм	0,02-6
Габариты, мм: длина, высота, ширина (без кронштейна под приемник)	860*764*530
Электродвигатель: тип мощность, кВт скорость вращения, об/мин	АОЛ2-11-4 0,6 1350

Предварительно высушенный концентрат загружался в мельницу в количестве 4 кг. Удельная поверхность концентрата определялась посредством прибора ПСХ-12.

Химический анализ осуществлялся в химической лаборатории АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева». В таблице 2.2 представлен химический анализ шихтовых компонентов. Определение химических элементов осуществляется атомно-эмиссионным методом анализа, а потерь при прокаливании – гравиметрическим методом анализа.

Таблица 2.2 – Химический состав шихтовых компонентов используемых при наработке партий сырых окатышей

Шихтовый компонент	Содержание компонентов в шихтовых составляющих, %																
	Fe _{общ}	FeO	Fe ₂ O ₃	Fe ₃ O ₄	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	TiO ₂	Mn	S	C	P	Na ₂ O	K ₂ O	проч.	п.п.п
Концентрат ОЖК	66,12	3,98 (в составе Fe ₃ O ₄)	90,05 (из них 8,8% в составе Fe ₃ O ₄)	12,8	2,1	0,1	0,22	0,71	0,00	0,02	0,035	0,38	0,01	0,01	0,04	2,3	2,88
Концентрат "Деррик и 67% пром."	67,1	27,5 (в составе Fe ₃ O ₄)	65,37 (в составе Fe ₃ O ₄)	92,87	5,94	0,03	0,17	0,14	0,00	0,09	0,01		0,01	0,05	0,12	0,57	0,68
Концентрат "Деррик и 70%"	70,00	27,53 (в составе Fe ₃ O ₄)	69,41 (в составе Fe ₃ O ₄)	97,02	2,43	0,00	0,2	0,14	0,00		0,01		0,00	0,08	0,12	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

Анализ химического состава концентрата ОЖК характеризует его как гематитовый концентрат; концентраты «Деррики 67% пром.» и «Деррики 70%» - магнетитовые. Целесообразно отметить относительно высокую основность концентрата ОЖК: CaO/SiO₂ =

0.34, при этом у концентрата «Деррики 70%» основность составляет 0,057. 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 $Fe_{\text{общ}}$. Необходимо отметить высокое содержание ППП (потери при прокаливании) в концентрате ОЖК - 2,88%, относительно магнетитового концентрата - 0,51%, 0,68%. Данное будет влиять на содержание железа общего в обожженных окатышах и на выход обожженных окатышей из сырых.

Методика определения удельной поверхности концентратов

Под удельной поверхностью понимают суммарную поверхность твердых частиц, отнесенную к единице массы ($\text{см}^2/\text{г}$, $\text{м}^2/\text{г}$) или к единице объема ($\text{см}^2/\text{см}^3$, см^{-1}) этого материала.

Поскольку скорость гетерогенных технологических процессов зависит от степени измельчения и соотношения зерен различных фракций в измельченном твердом материале, то удельная поверхность является весьма важной характеристикой и точное её определение является первостепенной задачей.

Метод по определению удельной поверхности основан на воздухопроницаемости слоя порошка [103]. В отечественной практике удельная поверхность сыпучих материалов определяется прибором типа ПСХ по Блейну.

Базовое уравнение для определения удельной поверхности:

$$S = \frac{14 \cdot K}{\gamma} \cdot \sqrt{\frac{E^3}{(1-E)^2}} \cdot \sqrt{\frac{1}{\eta}} \cdot \sqrt{\frac{H \cdot \tau}{V}}, \text{ см}^2/\text{г} \quad (2.1)$$

, где S – удельная поверхность порошкообразного материала, $\text{см}^2/\text{г}$;

K – константа гильзы, равная 1,74 для данного прибора, характеризует отношение поперечного сечения F и слоя порошкообразного материала l в гильзе;

γ – истинная плотность материала, $\text{г}/\text{см}^3$;

E – порозность материала, находящегося в гильзе, выраженная в долях единицы;

η – вязкость воздуха при температуре опыта, в пузах;

H – разрежение по манометру в см водяного столба,

τ – время, принятое для отсчета количества воздуха, прошедшего через слой порошкообразного материала, с.;

V – объем воздуха в см^3 , равный объему (массе) воды, вытекающей из аспиратора, за время τ ;

14 – пересчетный коэффициент.

Таблица 2.3 – Числовые значения E и η для расчета удельной поверхности

Порозность E в долях единицы	$\sqrt{\frac{E^3}{(1-E)^2}}$	Температура воздуха, °C	Вязкость воздуха, пуазы, η	$\sqrt{\frac{1}{\eta}}$
0,450	0,549	8	0,0001749	75,64
0,455	0,563	10	0,0001759	75,41
0,460	0,578	12	0,0001768	75,21
0,465	0,598	14	0,0001778	75,00
0,470	0,608	16	0,0001788	74,79
0,475	0,624	18	0,0001798	74,58
0,480	0,639	20	0,0001808	74,37
0,485	0,656	22	0,0001818	74,16
0,490	0,672	24	0,0001828	73,96
0,495	0,690	26	0,0001837	73,78
0,500	0,707	28	0,0001847	73,58
0,505	0,725	30	0,0001857	73,38
0,510	0,743	32	0,0001867	73,19
0,520	0,781	34	0,0001876	73,01
0,530	0,821			
0,540	0,863			
0,550	0,906			

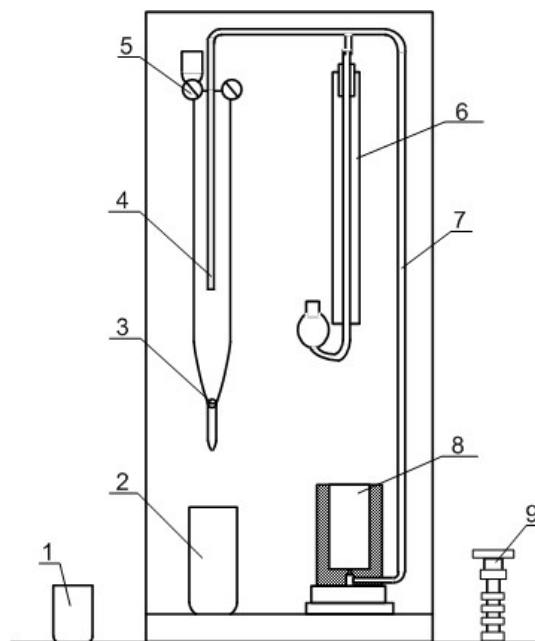
Ниже представлено описание установки по определению удельной поверхности концентратов.

Описание установки

Установка пневматического поверхностемера состоит из металлической гильзы, плунжера, манометра, регулятора, термометра и мерных стаканов (рисунок 2.2). Гильза, в которую помещают образец, представляет собой стальную трубку объёмом 10,25 см³. В нижней части гильзы выточены заплечики, на которые помещают перфорированный диск. Ниже уровня диска расположена трубка, служащая для присоединения гильзы к прибору. Плунжер предназначен для уплотнения порошка в гильзе. Вдоль оси плунжера просверлен канал для прохода воздуха.

Манометр представляет собой сосуд и стеклянную трубку, наполненные дистиллированной водой, и служит для измерения разрежения с помощью нанесенных отметок-рисок.

Регулятор разрежения состоит из стеклянного сосуда, заполненного водой. В сосуд впаяна стеклянная трубка для подачи воды через кран и трубка для присоединения к прибору.



1, 2 – стакан, 3, 5 – кран регулятора, 4 – регулятор разрежения, 6 – манометр; 7 – соединительный шланг, 8 – гильза, 9 – плунжер

Рисунок 2.2 – Принципиальная схема пневматического поверхностемера

Методика проведения работы

Измерения удельной поверхности проводятся в следующем порядке.

В гильзу прибора на перфорированный диск помещают кружок фильтровальной бумаги и высыпают навеску. На слой материала накладывают второй кружок фильтровальной бумаги и уплотняют порошок плунжером до соприкосновения упорного кольца плунжера с верхним краем гильзы, после уплотнения плунжер вынимают из гильзы.

Открывают нижний кран регулятора, подставив предварительно под него мерный стакан для сбора воды. Когда скорость истечения воды становится постоянной, под вытекающую из регулятора струю воды ставят другой стакан, предварительно взвешенный, и засекают время. После истечения заданного времени (30, 60, 90 сек.) стакан с водой взвешивают, чтобы определить массу воды, вытекшей из регулятора. Объем вытекшей воды равен объему воздуха, прошедшего за данное время через слой материала в гильзе. В период равномерного истечения воды из регулятора по манометру определяют разрежение в системе, характеризующее сопротивление слоя материала, находящегося в гильзе, проходящему через него воздуху.

Современные технологии позволяют автоматизировать значительную часть этапов выполнения измерений, таким образом опыты по определению удельной поверхности концентратов осуществлялись посредством прибора ПСХ-12, представленном на рисунке 2.3.



Рисунок 2.3 – Прибор для определения удельной поверхности ПСХ-12

Прибор ПСХ-12 – измеритель удельной поверхности и среднего размера частиц порошков. Приборы типа ПСХ включены в качестве обязательного средства контроля и измерений удельной поверхности и среднего размера частиц железорудных материалов: ГОСТ 21043-87.

Назначение и принцип действия

Прибор ПСХ-12 предназначен для лабораторных исследований и контроля технологических процессов диспергирования твердых материалов по величине их удельной поверхности и среднему размеру частиц. Все измерения и расчеты автоматизированы, что исключает фактор субъективной ошибки. Удельную поверхность (S , $\text{см}^2/\text{г}$) и среднемассовый размер частиц (d , $\mu\text{м}$) исследуемых дисперсных материалов прибор рассчитывает, визуализирует на дисплее NOTEBOOK, хранит в памяти и печатает в виде таблиц.

Прибор ПСХ-12 соответствует правилам современного приборостроения по степени автоматизации, которые минимизируют затраты труда и погрешность результатов измерений, экономят время оператора и обеспечивают высокую надежность и удобство хранения и извлечения полученной информации.

Автоматически по заданной программе и команде пользователя:

- Производит настройку прибора: калибрует кювету по высоте; проверяет герметичность; контролирует свою работоспособность по удельной поверхности встроенного контрольного эталона.

- Устанавливает число повторных измерений, производит измерения, подсчитывает их среднюю величину и погрешность.

- В режиме реального времени отображает на дисплее NOTEBOOK измеряемые параметры: высоту слоя порошка, вязкость и температуру воздуха, установленное оператором число повторных измерений и др.

- Представляет, дополняет и корректирует таблицу плотностей исследуемых материалов, данные которой автоматически используются в расчетах.

- Представляет результаты измерений в виде протокола, включающего исходные данные исследуемого порошка (или пористого образца), его удельную поверхность, размер частиц, среднее из повторных измерений, погрешность этих измерений и сводную таблицу серии измерений.

- Сохраняет в памяти и готовит для распечатки на принтере сводные данные о серии измерений с указанием даты и времени их выполнения.

Таблица 2.4 – Технические характеристики ПСХ-12

Диапазон измерений удельной поверхности, см ² /г	200 – 50.000
Диапазон измерений среднего размера частиц, мкм	0,5 – 250
Аппаратурная погрешность, не более %	± 0,3
Потребляемая мощность (220 В; 50 Гц), Вт	30
Габариты упаковки, мм	350x400x550
Масса без NB, кг	2,5

В таблице 2.5 представлены результаты.

Таблица 2.5 – Удельная поверхность концентратов

Концентрат	Удельная поверхность, см ² /г
ОЖК	2500
Доизмельченный ОЖК	2800
«Деррики 67% пром.»	1800
«Деррики 70%»	2550

Концентрат ОЖК целесообразно характеризовать как «тонкоизмельченный».

Вероятно, использование других связующих помимо бентонита от лаборатории окомкования (ЛОК) АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева» покажется интересным, с учетом наличия подобных исследований связующих [70]. Однако, бентонит, предоставленный лабораторией ЛОК ОТКМК УТК АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева», используется на постоянной основе для производства окатышей на ФОК АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева», таким образом, с учетом перспективы внедрения производства окатышей ОЖК на данной фабрике, использование других связующих не представилось актуальным. Для анализа качества используемого в исследованиях бентонита, у последнего определялись реологические свойства.

Методика определения эффективной вязкости бентонита

Для испытаний связующих добавок, поступающих в комовом виде, усредненную пробу высушивают до влажности 10 %, истирают и просеивают через сито с размером ячеек 0,071мм. В порошке для исследования содержание частиц размером меньше 0,071мм должно составлять не менее 90 %. Подготовленные пробы хранятся в эксикаторе.

Затем готовят суспензию из 10 г измельченного бентонита с остаточной влагой от 8 до 10 % и 90 мл дистиллированной воды. Смесь тщательно перемешивают стеклянной палочкой до исчезновения мазков на стенках и днище стакана. Далее производят перемешивание смеси электромешалкой в течение 10 минут для достижения максимальной однородности суспензии. Приготовленную суспензию заливают в контейнер ротационного вискозиметра ВСН – 3 до риски, нанесенной на его внутренней стенке. Цилиндр укрепляют в приборе, проба перемешивается при скорости вращения ротора 600 об/мин до достижения постоянного значения угла закручивания J_1 . Эффективная вязкость рассчитывается по уравнению:

$$\eta = \frac{A \cdot J_1}{0,600}, \text{ мПа}\cdot\text{с} \quad (2.2)$$

, где: η – эффективная вязкость, мПа·с;

A – константа прибора, Па·с·мин⁻¹·град⁻¹.

Приготовление суспензии и определение эффективной вязкости для одной пробы связующего производят три раза. За конечный результат принимают среднее из трех измерений. Допускаемое расхождение между результатами параллельных измерений составляет $\pm 4\%$ от среднего арифметического значения.

Методика определения набухаемости бентонита

Понятие набухаемости базируется на способности кристаллической решетки монтмориллонита к расширению в присутствии жидкости.

Пробу бентонита (бентопорошок) высушивают до постоянного веса в сушильном шкафу при температуре 105 °С. Затем бентонит насыпают в пробирку до отметки 5,0 мл, уплотняют постукиванием пробирки о резиновую поверхность (~20 раз), после чего вновь добавляют бентонит до отметки 5,0 мл.

Далее подготовленную пробу бентонита высыпают в мензурку объемом 100 мл и добавляют раствор дистиллированной воды с хлористым кальцием до отметки 50 мл (содержание CaCl₂ в воде составляет 5,0 %). После тщательного перемешивания добавляют тот же раствор (H₂O + CaCl₂) до отметки 100 мл и вновь перемешивают. Мензурку оставляют на 24 часа, бентонит начинает осаждаться и набухать. Спустя 24 часа фиксируют объем осадка по шкале мензурки. Набухаемость рассчитывается по формуле:

$$\xi = \frac{V_{ш} - V_{н}}{V_{н}}, \text{ доли ед.} \quad (2.3)$$

, где: ξ – набухаемость, доли ед.;

$V_{ш}$ – объем осадка, указанного на шкале мензурки, мл;

$V_{н}$ – начальный объем бентонита (5 мл).

Методика определения индекса набухания бентонита

Пробу бентонита массой 2 грамма с известной влажностью взвешивают на точных весах. Затем это количество при помощи шпателя небольшими порциями помещают в дистиллированную воду, налитую в цилиндрическую стеклянную мензурку. После осаждения первой порции порошка на дно мензурки, добавляют следующую порцию и т.д. Порошок бентонита впитывает воду и начинает набухать.

После 2-х часовой выдержки определяют объем осадка.

Индекс набухания (объем осадка) рассчитывается по следующей формуле:

$$I = \frac{V \cdot 100}{100 - M}, \text{ мл/2г} \quad (2.4)$$

, где: I – индекс набухания, мл/2г;

V – объем осадка, указанного на дне мензурки;

M – влажность бентонита при исследовании, %.

Погрешность между результатами параллельных определений составляет $\pm 5\%$ от среднеарифметического.

Влажность материалов определяется (по ГОСТ 12764) по формуле:

$$W = \frac{(m_1 - m_2)}{(m_1 - m)} \cdot 100, \% \quad (2.5)$$

, где: W – массовая доля влаги, %;

m_1 – масса тары с навеской до высушивания, кг;

m_2 – масса тары с навеской после высушивания, кг;

m – масса тары, кг.

В таблице 2.6 представлены результаты исследования физических свойств, используемых бентонита и известняка.

Таблица 2.6 – Физические свойства бентонита, известняка и коксика

Компонент	Влажность, % /ВТУ	Индекс набухания, мл/2г /ВТУ	Эффективная вязкость, мПа*с /ВТУ	Набухаемость, раз /ВТУ	Содержание класса - 71мкм, % /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	

Анализ таблицы 2.6 показывает, что используемые в лабораторных испытаниях бентонит и известняк удовлетворяют критериями качества относительно внутренних технических условий (ВТУ). Необходимо отметить, что для высокой степени равномерности распределения шихтовых компонентов в концентрате, размеры частиц шихтовых компонентов должны быть приближены к размерам частиц концентрата, поэтому в коксике содержание класса 71мкм должно быть не менее 90%. При этом, в результате термообработки, с использованием измельченного коксика в окатыше образуются не большие поры (размеры пор влияют на прочность обожженных окатышей [110], как было бы при использовании коксика с крупными частицами.

2.2 Минералогический анализ концентратов для получения окатышей ОЖК

Валовый минеральный состав концентратов определен рентгеноструктурным методом. Использован рентгеновский дифрактометр Shimadzu XRD-6000, Cu-K α излучение с монохроматором, скорость съемки 1°/мин. Расчет выполнен методом полнопрофильного анализа (Ритвельда) с использованием программного пакета Siroquant V.4. Результаты определения содержаний кристаллических фаз приведено к 100 мас. %. Содержание рентгеноаморфной фазы не анализировалось, т.к. является специальной задачей.

Из каждого концентрата изготовлены полированные препараты, которые изучены оптически (микроскоп Axioscope A1).

Оценка содержания элементов-примесей в концентратах проведена при помощи рентгенофлуоресцентного анализатора (портативный прибор Innov-X alfa, калибровка по стандартному образцу).

Для удобства восприятия результатов минералогического исследования проб концентратов, каждой из них присвоен номер, как представлено в таблице 2.6а.

Таблица 2.6а – Исследуемые концентраты

Концентрат	Проба №
ОЖК	1
ОЖК доизмельченный	2
Смесь ОЖК+ «Деррики 70%»	3
Смесь ОЖК+ «Деррики 67% пром.»	4

Минеральный состав концентратов приведен в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Минеральный состав концентратов

Проба №	Рудные минералы, %			Нерудные минералы, %
	Главные (>10%)	Второстепенные (1-13%)	Редкие (<1%)	
1	Гематит 73-76% Гетит 16%	Магнетит 10-13%	Пирит ед.з.	Слюда 2% Кварц 1% Кальцит 1%
2	Гематит 73-76% Гетит 16%	Магнетит 10-13%	Пирит ед.з.	Кварц 2% Кальцит 2%
3	Магнетит 47% Гематит 39%	Гетит 9%	Пирит ед.з.	Слюда 3% Кварц 3% Кальцит 1%
4	Магнетит 49% Гематит 36%	Гетит 8%	Пирит ед.з.	Слюда 4% Кварц 1% Кальцит 1%

Примечание. Содержание главных и второстепенных минералов определено по данным рентгеноструктурного анализа; редких – оптико-минералогического анализа; ед.з. – единичные зерна.

Концентрат ОЖК (проба №1)

Концентрат на 73 % состоит из гематита, подчиненное значение имеют магнетит и гетит в соотношении примерно 1:1,2. В качестве редких минералов обнаружен пирит. Нерудные минералы представлены кварцем, кальцитом, слюдой и хлоритом, их количество не превышает 4 %.

Минеральный состав концентратов приведен в таблице 2.7. Форма выделений рудных минералов представлена на рисунке 2.4.

Гематит представлен свободными зернами с остроугольными краями, образует вросстки и прожилки мощностью 50 мкм в нерудных минералах, реже сростается с магнетитом, гетитом и пиритом, отмечен в виде тонких ламеллярных выделений по периферии магнетита. В плоском сечении трещиноватый, иногда содержит тонкие (5-10 мкм) включения магнетита, может быть окаймлен гетитом. Кайма гетита составляет 10-50 мкм. Размер гематита варьирует от 30-50 мкм в сростках до 0.1-0.5 мм в свободном виде. Мощность ламелл составляет 2 мкм, длина – 10-15 мкм.

Магнетит встречается в виде свободных остроугольных и трещиноватых зерен, иногда сростается с гематитом, образует включения в нем, по периферии зерен мартитизирован, содержит тонкие ламеллы гематита. Размер магнетита не превышает 50 мкм.

Гетит развивается в виде корок, пленок на оксидах железа, сульфидах и нерудных минералах, образует каймы вокруг гематита. Мощность кайм варьирует от 10 до 50 мкм. Размеры корок варьируют от 30 мкм до 0.1 мм, редко 0.5 мм.

Пирит представлен единичными свободными зернами и сростками с гематитом. В плоском сечении тонкопористый, трещиноватый, с тонкими (2 мкм) включениями нерудных минералов, может быть окаймлен гетитом. Размер выделений пирита составляет 20-50 мкм.

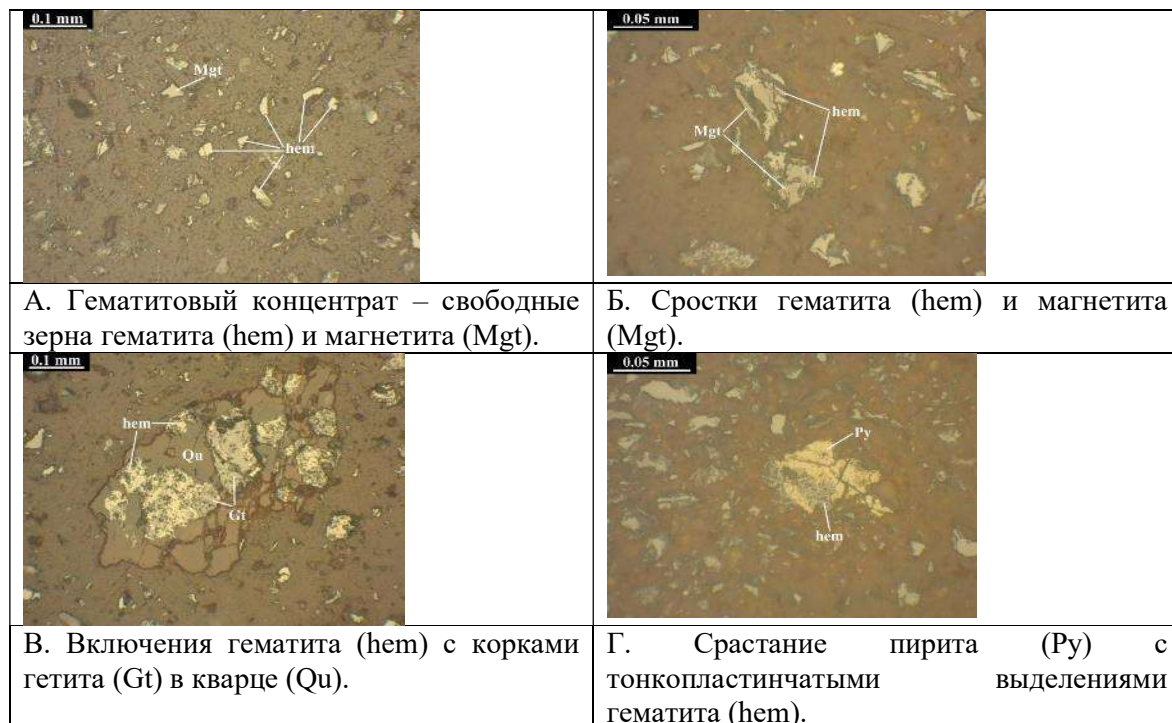


Рисунок 2.4 – Форма выделений рудных минералов в концентрате (проба №1)

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 является кварц, слюда, хлорит, ещё присутствует кальцит, их суммарное количество составляет 4 %. Все зерна преимущественно свободные, взаимные сростки магнетита и гематита редки.

Концентрат ОЖК доизмельченный (проба №2)

Концентрат интенсивно окислен. Основу концентрата составляют гематит (резко преобладает) и гетит, магнетит и нерудные минералы имеют подчиненное значение. Среди редких минералов установлен пирит. Нерудные минералы представлены кварцем и кальцитом в соотношении 1:1.

Минеральный состав концентрата приведен в таблице 2.7. Морфология выделений основных рудных минералов представлена на рисунке 2.5.

Гематит представлен свободными остроугольными зернами в сечении, трещиноватый, сростается с гетитом, редко магнетитом и нерудными минералами. Границы сростаний гематита с другими минералами сложные, извилистые. Встречается в виде тонкой и мелкой (5-70 мкм) вкрапленности в обломках (размером 1-1.5 мм) нерудных минералов. Гематит иногда образует кайму по периферии магнетита и тонкие (1-2 мкм) длиной 5-10 мкм ламелли в магнетите, может замещаться гетитом, с сохранением реликтов размером 2-5 мкм. В гематите редко встречаются включения магнетита размером 5-20 мкм и нерудных минералов размером 2-5 мкм. Размер гематита варьирует от 5 до 70 мкм в свободном виде и составляет 20-40 мкм в сростках.

Магнетит отмечен в виде свободных остроугольных зерен, единичных сростаний с гематитом, гетитом и нерудными минералами, и тонких (5-20 мкм) включений в гематите. Магнетит в плоском сечении трещиноватый, по периферии может замещаться и содержать тонкие (2-5 мкм) ламелли гематита. Размер магнетита в свободном виде и в сростках составляет 10-50 мкм.

Пирит встречается в виде свободных угловатых и вытянутых зерен, в плоском сечении пористый, иногда с тонкими (до 5 мкм) выделениями гетита по периферии зерен. Размер пирита составляет 8-40 мкм в сечении.


	
<p>А. Концентрат №2. Свободные зерна и взаимные сростки магнетита (Mgt) и гематита (hem).</p>	<p>Б. Магнетит (Mgt) с включениями гематита (hem) и свободные зерна гетита (Gt).</p>
	
<p>В. Сростки гематита (hem) и гетита (Gt).</p>	<p>Г. Пирит (Py) с тонкими выделениями гетита (Gt).</p>

Рисунок 2.5 – Морфология выделений основных рудных минералов в концентрате (проба №2)

Гетит представлен отдельными корками, пленками на оксидах железа и нерудных минералах, охрой. Гетит срстается с гематитом и нерудными минералами, развивается в виде кайм по гематиту, участками замещая гематит вплоть до образования полных псевдоморфоз, иногда с сохранением реликтов гематита размером 2-5 мкм. Мощность кайм гетита составляет 5-10 мкм. Размер корок гетита и их срстаний с другими минералами составляет 5-50 мкм.

Смесь концентратов ОЖК+ «Деррики 70%» (проба №3).

Концентрат менее окислен, чем №2. Основу концентрата составляют магнетит и гематит в соотношении практически 1:1, подчиненное значение имеют гетит и нерудные минералы. Среди редких минералов отмечен пирит. Среди нерудных минералов преобладают слюда и кварц в соотношении 1:1, незначительно распространен кальцит.

Минеральный состав концентрата приведен в таблице 2.7. Морфология выделений основных рудных минералов представлена на рисунке 2.6.

Магнетит и гематит представлены свободными остроугольными зернами, взаимными срстаниями и срстками с гетитом и нерудными минералами. В плоском сечении трещиноватые, гематит участками пористый. Магнетит образует включения

размером 5-10 мкм в гематите. Гематит может развиваться по периферии магнетита и в виде тонких (1-2 мкм) длиной 5-10 мкм ламелл в магнетите. Размер свободных зерен оксидов железа варьирует от 5 до 70 мкм для гематита и до 50 мкм для магнетита, в сростках составляет 20-40 мкм.

Пирит – единичные обломки кубических кристаллов, в плоском сечении пористые. Размер пирита составляет 30-35 мкм в сечении.

Гетит встречается в виде корок, пленок на оксидах железа и нерудных минералах, охры, сростается с гематитом, редко с магнетитом. Гетит может развиваться в виде кайм по гематиту, замещая его вплоть до образования полных псевдоморфоз. Размер гетита в свободном виде и в сростках составляет 10-50 мкм, редко в сростках может достигать 0.2 мм.

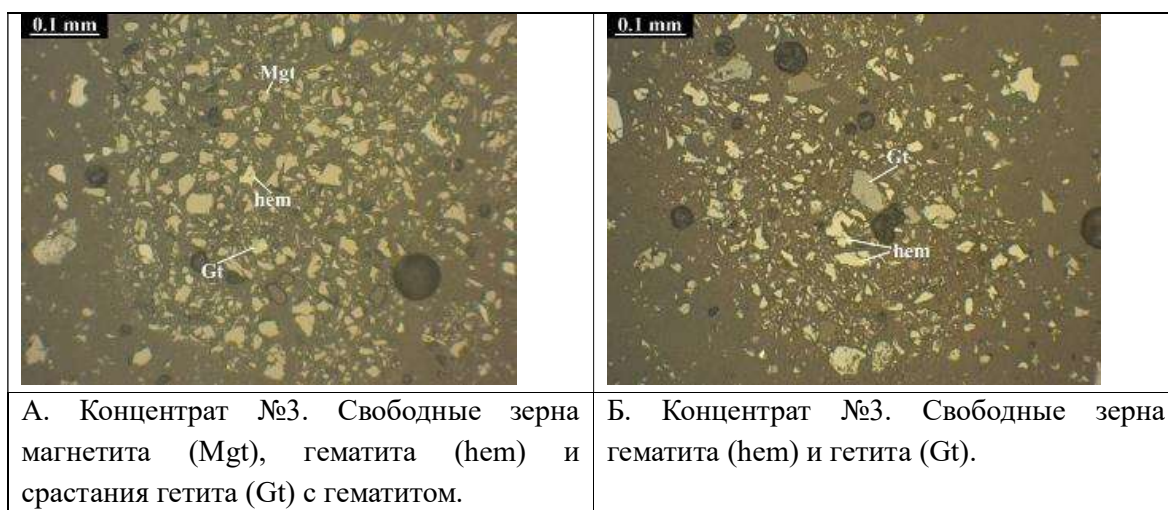


Рисунок 2.6 – Морфология выделений основных рудных минералов в концентрате (проба №3)

Смесь концентратов ОЖК+ «Деррики 67% пром.» (проба №4)

Концентрат частично окислен. Основу концентрата составляют магнетит и гематит, подчиненное значение имеют гетит и нерудные минералы. Среди редких минералов установлен пирит. Среди нерудных минералов преобладает слюда, незначительно распространены кварц и кальцит.

Минеральный состав концентрата приведен в таблице 2.7. Морфология выделений основных рудных минералов представлена на рисунке 2.7.

Магнетит и гематит представлены свободными остроугольными зернами, взаимными сростаниями и сростками с нерудными минералами, гематит может сростаться с гетитом. Магнетит и гематит в плоском сечении трещиноватые, гематит участками пористый, образуют включения друг в друге. Гематит иногда образует кайму по периферии магнетита. Размер оксидов железа варьирует от 5 до 70 мкм в свободном виде, составляет 20-50 мкм в сростках и 5-20 мкм во включениях.

Пирит отмечен в виде свободных удлиненных зерен до 70 мкм, иногда с включениями магнетита. Размер включений в пирите составляет 5-15 мкм.

Гетит встречается в виде корок, сростаний с оксидами железа и нерудными минералами, охры. Гетит развивается по гематиту и магнетиту до образования полных псевдоморфоз, иногда сохраняя реликты оксидов железа размером 5-10 мкм.

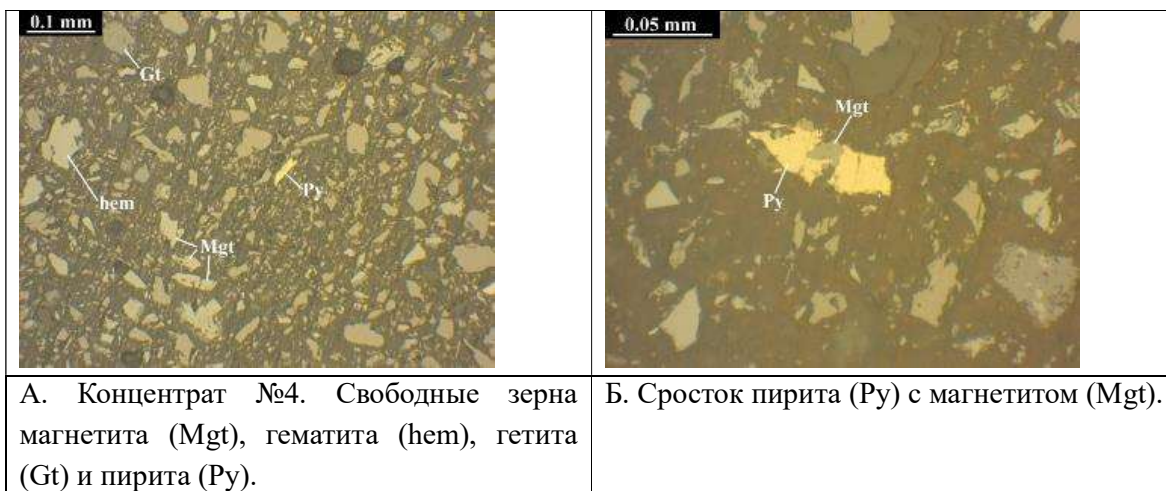


Рисунок 2.7 – Морфология выделений основных рудных минералов в концентрате (проба №4)

Сравнительная характеристика концентратов №1 (концентрат ОЖК) и №2 (концентрат ОЖК доизмельченный)

Оба концентрата интенсивно окислены. По минеральному составу практически одинаковые: на 73-76% состоят из гематита, 16% гетита и 10-13% магнетита соответственно. Обнаружены единичные зерна пирита. Нерудные минералы составляют 4%, разница заключается в их наборе. В концентрате №1 среди нерудных выделяются слюда, кварц и кальцит в соотношении 2:1:1, в концентрате №2 – только кварц и кальцит в соотношении 1:1.

Сравнительная характеристика концентратов №1 (концентрат ОЖК), №3 (смесь концентратов ОЖК+ «Деррики 70%») и №4 (смесь концентратов ОЖК+ «Деррики 67% пром.»)

Концентраты №3 и №4 по минеральному составу сходные, на 47-49% состоят из магнетита, 39-36% гематита и 9-8% гетита соответственно. В обоих концентратах присутствуют единичные зерна пирита. Содержание нерудных минералов не превышает 5 и 8% соответственно, их соотношение варьирует. В концентрате №3 среди нерудных преобладает слюда, незначительно распространены кварц и кальцит, в концентрате №4 преобладают слюда и кварц, несущественное количество составляет кальцит. Концентраты №3 и №4 гематит-магнетитовые, менее окислены и тем самым отличаются от преимущественно гематитового и более окисленного концентрата №1. Содержание гематита и гетита в концентратах №3 и №4 примерно наполовину ниже, чем в концентрате №1. Количество нерудных минералов в концентратах №3 и №4 выше на 1 и 4% соответственно, чем в концентрате №1. Набор нерудных минералов сходен (слюда, кварц, кальцит), их соотношение варьируется.

Концентрат №2 преимущественно гематитовый (76%), количество магнетита не превышает 13%. Концентрат интенсивно окислен, содержание гетита в нем составляет 16%. Нерудные минералы представлены кварцем и кальцитом в соотношении 1:1, их количество составляет 4%. Концентраты №3 и №4 по минеральному составу гематит-магнетитовые. Соотношение магнетита и гематита составляет практически 1:1, их суммарное количество – 86 и 85% соответственно. Концентраты менее окислены, содержание гетита (8-9%)

наполовину меньше, чем в концентрате №2. Нерудные минералы представлены слюдой, кварцем и кальцитом, их соотношение варьирует, суммарное содержание в концентратах составляет 5 и 8% соответственно.

Сравнительная оценка показала, что концентрат №2 имеет сходный, а концентраты №3 и №4 отличный минеральный состав от минерального состава концентрата №1.

2.3 Седиментационный анализ концентратов для наработки окатышей ОЖК

Седиментационный анализ концентратов производился на приборе HELOS (рисунок 2.8). Анализатор HELOS предназначен для измерения размеров частиц в диапазоне от 0.1 мкм до 3500 мкм. HELOS — это первая в мире система, в которой используется метод, основанный на теории дифракции по Фраунгоферу для всего диапазона измерения. С помощью диспергирующих модулей данная система анализа по размерам частиц способна определять размер частиц в порошковых материалах, суспензиях, эмульсиях, аэрозолях и спреях. Система спроектирована и построена в полном соответствии с международным стандартом ISO 13320-1 «Анализ по размерам частиц — методы лазерной дифракции» и внесена в Государственный реестр средств измерения.

Высокое разрешение и гарантированная повторяемость результатов измерений в сочетании с высокой скоростью получения данных и расчета дифракционного рассеяния приводит к великолепному и точному результату.

Аналитическая система HELOS выполнена в модульной конфигурации и в сочетании с необходимой системой диспергирования образца идеально адаптируется к любой задаче анализа. Краткое описание прибора представлено в Приложении Б.



Рисунок 2.8 – Седиментационный анализатор HELOS (общий вид)

Также, исследуемые концентраты (таблица 2.6а) подвергались седиментационному анализу.

Концентрат ОЖК

Результаты седиментационного анализа концентрата ОЖК представлены на рисунке 2.9. На рисунке 2.9 изображен график процентного содержания в концентрате частиц различного размера. Таким образом, анализ данного графика показал, что 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%.

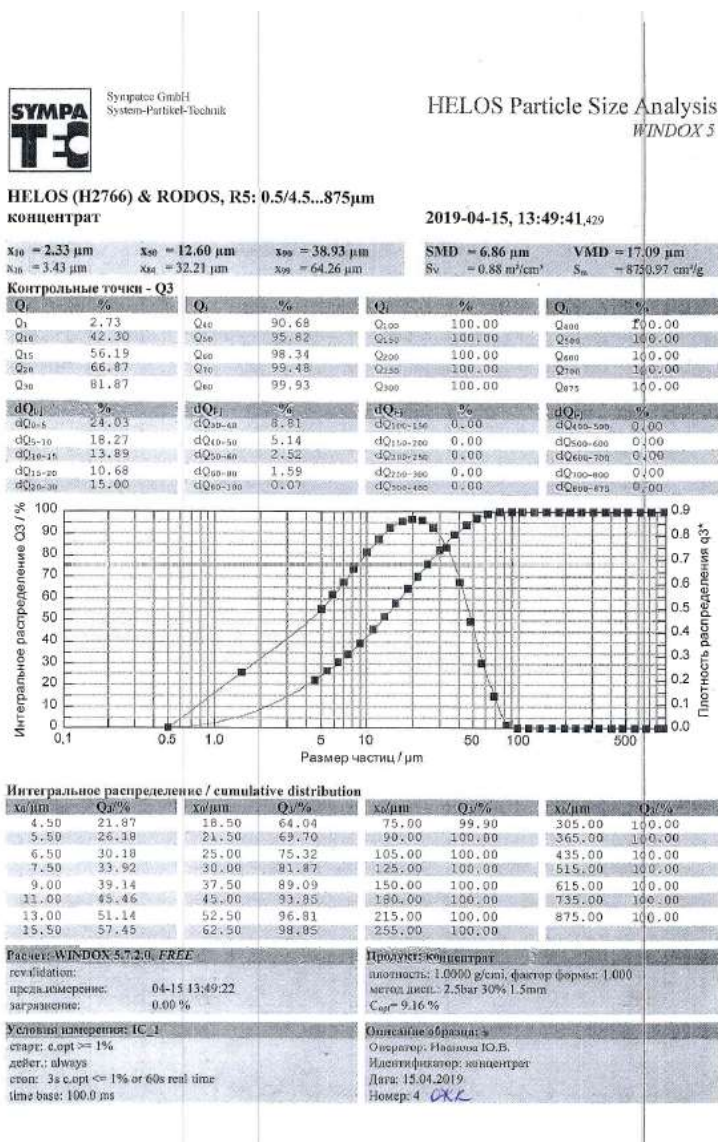


Рисунок 2.9 – Результаты седиментационного анализа концентрата ОЖК

Концентрат ОЖК доизмельченный

Результаты представлены на рисунке 2.10. Выявлено, что в доизмельченном концентрате ОЖК содержание класса <45мкм составляет 96,26%, что на 2,41% выше, чем у концентрата ОЖК исходного. Данное объясняется непосредственно доизмельчением концентрата ОЖК с удельной поверхностью 2500 см²/г до 2800 см²/г.



Sympatec GmbH
System-Partikel-Technik

HELOS Particle Size Analysis
WINDOX 5

HELOS (H2766) & RODOS, R5: 0.5/4.5...875µm
концентрат

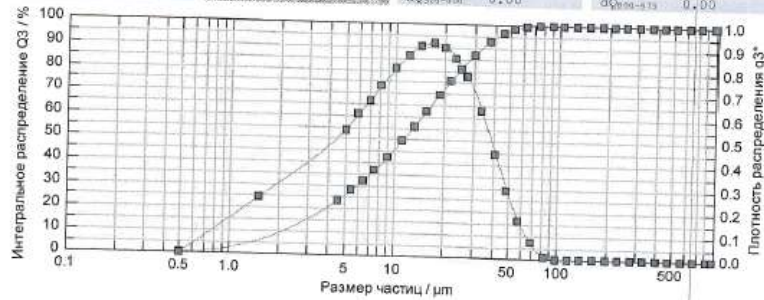
2019-06-06, 14:35:06,976

$x_{10} = 2.23 \mu\text{m}$ $x_{50} = 11.32 \mu\text{m}$ $x_{90} = 34.10 \mu\text{m}$ **SMD = 6.50 µm** **VMD = 15.15 µm**
 $x_{10} = 3.27 \mu\text{m}$ $x_{50} = 27.80 \mu\text{m}$ $x_{90} = 59.06 \mu\text{m}$ $S_V = 0.92 \text{ m}^2/\text{cm}^3$ $S_m = 9234.81 \text{ cm}^3/\text{g}$

Контрольные точки - Q3

Q _i	%	Q _i	%	Q _i	%	Q _i	%
Q ₁	2.89	Q ₁₀	93.93	Q ₁₀₀	100.00	Q ₄₀₀	100.00
Q ₅	45.49	Q ₅₀	97.56	Q ₁₅₀	100.00	Q ₅₀₀	100.00
Q ₁₅	60.75	Q ₆₀	99.11	Q ₂₀₀	100.00	Q ₆₀₀	100.00
Q ₃₀	72.08	Q ₇₀	99.74	Q ₃₀₀	100.00	Q ₇₀₀	100.00
Q ₅₀	86.68	Q ₉₀	99.97	Q ₅₀₀	100.00	Q ₉₇₅	100.00

dQ _{i,j}	%	dQ _{i,j}	%	dQ _{i,j}	%	dQ _{i,j}	%
dQ ₀₋₅	25.43	dQ ₁₀₋₁₅	7.25	dQ ₁₅₀₋₂₀₀	0.00	dQ ₄₀₀₋₅₀₀	0.00
dQ ₅₋₁₀	20.06	dQ ₁₅₋₂₀	3.63	dQ ₂₀₀₋₃₀₀	0.00	dQ ₅₀₀₋₆₀₀	0.00
dQ ₁₀₋₁₅	15.26	dQ ₂₀₋₃₀	2.05	dQ ₃₀₀₋₄₀₀	0.00	dQ ₆₀₀₋₇₀₀	0.00
dQ ₁₅₋₂₀	11.33	dQ ₃₀₋₄₀	0.86	dQ ₄₀₀₋₅₀₀	0.00	dQ ₇₀₀₋₈₀₀	0.00
dQ ₂₀₋₃₀	14.60	dQ ₄₀₋₅₀	0.02	dQ ₅₀₀₋₆₀₀	0.00	dQ ₈₀₀₋₉₇₅	0.00



Интегральное распределение / cumulative distribution

x ₀ /µm	Q ₀ /%	x ₀ /µm	Q ₀ /%	x ₀ /µm	Q ₀ /%	x ₀ /µm	Q ₀ /%
4.50	23.10	18.50	69.15	75.00	99.96	305.00	100.00
5.50	27.78	21.00	73.00	90.00	100.00	365.00	100.00
6.50	32.14	25.00	80.58	105.00	100.00	435.00	100.00
7.50	36.33	30.00	86.88	120.00	100.00	515.00	100.00
9.00	42.00	37.50	92.76	150.00	100.00	615.00	100.00
11.00	48.99	45.00	96.26	180.00	100.00	735.00	100.00
13.00	55.24	52.50	98.20	215.00	100.00	875.00	100.00
15.50	62.13	62.50	99.42	255.00	100.00		

Parser: WINDOX 5.7.2.0, FREE

revalidation:
предв.измерение: 06-06 14:34:37
напряжение: 0.00 %

Условия измерения: IC_1
start: c.opt >= 1%
defect: always
stop: 3s c.opt <= 1% or 60s real time
time base: 100.0 ms

Продукт: концентрат
плотность: 1.0000 g/cm³, фактор формы: 1.000
метод дисп.: 2.5bar 45% 2.0mm
C_{opt} = 7.01 %

Описание образца:
Оператор: Иванова Ю.В.
Идентификатор: концентрат
Дата: 06.06.2019
Номер: 10

Рисунок 2.10 – Результаты седиментационного анализа концентрата ОЖК доизмельченного

Смесь концентратов ОЖК+ «Деррики 70%»

Результаты представлены на рисунке 2.11. В смеси концентратов ОЖК+ «Деррики 70%» содержание класса -45мкм составляет 93,69%, что соответствует аналогичному показателю у рядового магнетитового концентрата АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева» – 45 мкм > 90%.



Synapse GmbH
System-Partikel-Technik

HELOS Particle Size Analysis
WINDOX 3

HELOS (H2766) & RODOS, R5: 0.5/4.5...875µm
концентрат

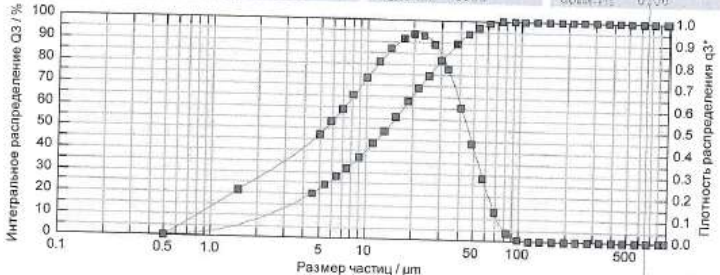
2019-06-06, 14:37:45.225

$X_{10} = 2.51 \mu\text{m}$ $X_{50} = 13.49 \mu\text{m}$ $X_{90} = 39.15 \mu\text{m}$ $SMD = 7.24 \mu\text{m}$ $VMD = 17.67 \mu\text{m}$
 $X_{18} = 3.72 \mu\text{m}$ $X_{84} = 32.53 \mu\text{m}$ $X_{99} = 66.14 \mu\text{m}$ $S_v = 0.83 \text{ m}^2/\text{cm}^3$ $S_n = 8288.86 \text{ cm}^2/\text{g}$

Контрольные точки - Q3

Q _i	%	Q _i	%	Q _i	%	Q _i	%
Q ₁	2.49	Q ₅₀	90.53	Q ₁₀₀	99.99	Q ₂₀₀	100.00
Q ₅	39.73	Q ₉₅	95.63	Q ₁₅₀	100.00	Q ₃₀₀	100.00
Q ₁₀	53.99	Q ₉₉	98.18	Q ₂₀₀	100.00	Q ₄₀₀	100.00
Q ₂₀	65.36	Q _{99.5}	99.31	Q ₃₀₀	100.00	Q ₆₀₀	100.00
Q ₅₀	81.48	Q _{99.9}	99.80	Q ₄₀₀	100.00	Q ₈₀₀	100.00

dQ ₁	%	dQ ₁	%	dQ ₁	%	dQ ₁	%
dQ ₁₋₅	21.92	dQ ₁₀₋₁₅	9.05	dQ ₁₅₋₂₀	0.01	dQ ₂₀₋₂₅	0.00
dQ ₅₋₁₀	17.81	dQ ₁₅₋₂₀	5.10	dQ ₂₀₋₂₅	0.00	dQ ₂₅₋₃₀	0.00
dQ ₁₀₋₁₅	14.26	dQ ₂₀₋₂₅	2.55	dQ ₂₅₋₃₀	0.00	dQ ₃₀₋₃₅	0.00
dQ ₁₅₋₂₀	11.37	dQ ₂₅₋₃₀	1.61	dQ ₃₀₋₃₅	0.00	dQ ₃₅₋₄₀	0.00
dQ ₂₀₋₂₅	16.12	dQ ₃₀₋₃₅	0.19	dQ ₃₅₋₄₀	0.00	dQ ₄₀₋₄₅	0.00



Интегральное распределение / cumulative distribution

X ₀ /µm	Q _i /%	X ₀ /µm	Q _i /%	X ₀ /µm	Q _i /%	X ₀ /µm	Q _i /%
4.50	19.89	18.50	62.31	75.00	99.71	305.00	100.00
5.90	23.96	21.80	68.40	90.00	99.97	365.00	100.00
6.50	27.79	25.00	74.48	105.00	100.00	435.00	100.00
7.50	31.43	30.00	81.49	125.00	100.00	515.00	100.00
9.00	36.56	37.50	88.96	150.00	100.00	615.00	100.00
11.00	42.90	45.00	93.69	180.00	100.00	735.00	100.00
13.00	48.72	52.50	96.60	215.00	100.00	875.00	100.00
15.50	55.31	62.50	98.71	255.00	100.00		

Расчет: WINDOX 5.7.2.0, FREE
 revalidation:
 предвзвешение: 06-06 14:37:19
 загрязнение: 0.00 %

Условия измерения: IC_1
 start: c.орт >= 1%
 default: always
 stop: 3s c.орт <= 1% or 60s real time
 time base: 100.0 ms

Продукт: концентрат
 плотность: 1.0000 g/cm³, фактор формы: 1.000
 метод дисп.: 2.5bar 45% 2.0mm
 S_{дп} = 7.38 %

Описание образца:
 Оператор: Иванова Ю.В.
 Идентификатор: концентрат
 Дата: 06.06.2019
 Номер: 11

Рисунок 2.11 – Результаты седиментационного анализа смеси концентратов ОЖК+ «Деррики 70%»

Смесь концентратов ОЖК+ «Деррики 67% пром.»

Результаты представлены на рисунке 2.12. В смеси концентратов ОЖК+ «Деррики 67% пром.» содержание класса -45мкм составляет 87,63%; данное связано с относительно низким содержанием в концентрате «Деррики 67% пром.» класса -45мкм – 86,95%. Относительно низкое содержание класса крупности частиц в концентрате «Деррики 67% пром.» подтверждается показателем удельной поверхности данного концентрата – 1800 см²/г.



Sympatec GmbH
System-Partikel-Technik

HELOS Particle Size Analysis
WINDOX 5

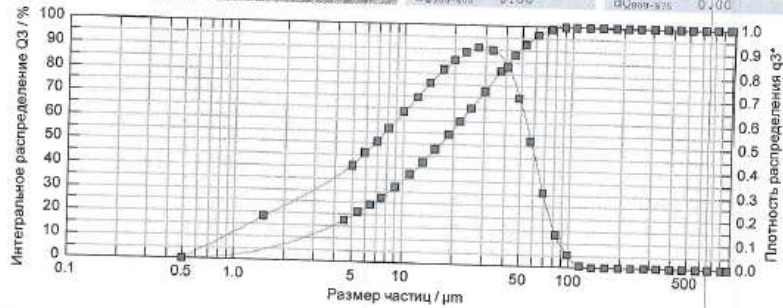
HELOS (H2766) & RODOS, R5: 0.5/4.5...875µm
концентрат

2019-06-06, 14:40:15.429

$x_{10} = 2.84 \mu\text{m}$	$x_{50} = 16.61 \mu\text{m}$	$x_{90} = 48.81 \mu\text{m}$	SMD = 8.18 μm	VMD = 21.83 μm
$x_{16} = 4.25 \mu\text{m}$	$x_{84} = 40.82 \mu\text{m}$	$x_{99} = 80.33 \mu\text{m}$	$S_V = 0.73 \text{ m}^3/\text{cm}^3$	$S_{90} = 7332.43 \text{ cm}^3/\text{g}$

Контрольные точки - Q3			
Q _i	%	Q _i	%
Q ₁	2.13	Q ₁₀	83.29
Q ₅	7.82	Q ₅₀	100.00
Q ₁₅	46.55	Q ₈₀	100.00
Q ₂₀	56.67	Q ₉₀	100.00
Q ₂₅	72.42	Q ₉₅	100.00

dQ _i		dQ _j		dQ _k	
	%		%		%
dQ ₀₋₅	18.83	dQ ₃₀₋₄₀	10.87	dQ ₁₇₀₋₁₈₀	0.13
dQ ₅₋₁₀	15.36	dQ ₄₀₋₅₀	7.45	dQ ₁₈₀₋₂₀₀	0.00
dQ ₁₀₋₁₅	12.36	dQ ₅₀₋₆₀	4.51	dQ ₂₀₀₋₂₅₀	0.00
dQ ₁₅₋₂₀	10.13	dQ ₆₀₋₈₀	3.72	dQ ₂₅₀₋₃₀₀	0.00
dQ ₂₀₋₂₅	8.74	dQ ₈₀₋₁₀₀	0.89	dQ ₃₀₀₋₄₀₀	0.00



Интегральное распределение / cumulative distribution							
$x_0/\mu\text{m}$	$Q_3/\%$	$x_0/\mu\text{m}$	$Q_3/\%$	$x_0/\mu\text{m}$	$Q_3/\%$	$x_0/\mu\text{m}$	$Q_3/\%$
4.50	17.08	18.50	53.90	75.00	98.63	305.00	100.00
5.50	20.58	21.50	59.45	90.00	99.67	365.00	100.00
6.50	23.89	25.00	65.24	105.00	99.98	435.00	100.00
7.50	27.02	30.00	72.42	125.00	100.00	515.00	100.00
9.00	31.45	37.50	81.12	150.00	100.00	615.00	100.00
11.00	36.93	45.00	87.63	180.00	100.00	735.00	100.00
13.00	41.95	52.50	92.30	215.00	100.00	875.00	100.00
15.50	47.70	62.50	96.28	255.00	100.00		

Расчет: WINDOX 5.7.2.0, FREE recalibration: время измерения: 06-06 14:39:36 загрязнение: 0.00 %	Продукт: концентрат плотность: 1.0000 g/cm ³ , фактор формы: 1.000 метод дисп.: 2.5bar 45% 2.0mm $C_{opt} = 10.96 \%$
Условия измерения: IC_1 старт: с.опт >= 1% дебет: always стоп: 3s с.опт <= 1% or 60s real time time base: 100.0 ms	Описание образца: Оператор: Шапова Ю.В. Идентификатор: концентрат Дата: 06.06.2019 Номер: 12

Рисунок 2.12 – Результаты седиментационного анализа смеси концентратов ОЖК+ «Деррики 67% пром»

2.4 Выводы по главе 2

1. Анализ химического состава концентрата ОЖК характеризует его как гематитовый концентрат; концентраты «Деррики 67% пром.» и «Деррики 70%» - магнетитовые.
2. Необходимо отметить высокое содержание ППП (потери при прокаливании) в концентрате ОЖК - 2,88%, относительно магнетитового концентрата - 0,51%, 0,68%. Относительно высокое содержание ППП объясняется, в том числе, содержанием гетита в концентрате (16%). Данное будет влиять на содержание железа общего в обожженных окатышах и на выход обожженных окатышей из сырых.

3. Целесообразно отметить относительно высокую основность концентрата ОЖК: $CaO/SiO_2 = 0,34$. 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 Feобщ.
4. Концентрат ОЖК целесообразно характеризовать как «тонкоизмельченный» (удельная поверхность 2500 см²/г).
5. Используемые в лабораторных испытаниях бентонит и известняк удовлетворяют критериям качества.
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 является кварц, слюда, хлорит, ещё 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 мкм составляет 93,85%, что соответствует аналогичному показателю у рядового магнетитового концентрата АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева» – 45 мкм > 90%.

Проведенные исследования химического состава концентратов и других шихтовых компонентов позволили осуществить расчеты материальных балансов «окомкования и обжига» с учетом требований потенциальных заказчиков к составу обожженных окатышей и способствовали дальнейшим расчетам дозировок шихтовых компонентов в окатыши. Полученные данные использовались как часть исходных данных для расчетов на математической модели.

Исследования минералогического состава концентратов позволили подтвердить и идентифицировать наличие того или иного рудного минерала в них.

Определение удельной поверхности концентратов позволило оценить потребность в их дополнительном доизмельчении и способность к окомкованию. Концентраты с низкой удельной поверхностью окомковываются хуже, как и концентраты с высокой удельной поверхностью. Крупные зерна концентрата обладают меньшей способностью к «склеиванию» капиллярными силами и бентонитом при окомковании, в то время как сильно мелкие зерна концентрата способствуют образованию новых зародышей вместо роста уже образовавшихся при окомковании. Таким образом, например, оптимальная удельная поверхность рядового концентрата Михайловского месторождения составляет 1600-2100 см²/г.

Седиментационный анализ концентратов позволил оценить общее содержание класса -45 мкм в них, что влияет на комкуемость концентратов, как и удельная поверхность.

Исследование физических свойств шихтовых компонентов позволило оценить их пригодность к использованию при проведении исследований. Концентрат ОЖК пригоден для дальнейшего производства из него сырых окатышей.

3 ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕРИАЛЬНЫХ БАЛАНСОВ ШИХТОВЫХ СОСТАВОВ, ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СЫРЫХ И СУХИХ ОКАТЫШЕЙ ОЖК

В общем объеме выполнено 28 лабораторных и полупромышленных опытов по 11-ти различным шихтовым составам, с целью наработки партий сырых и обожженных окатышей, ориентированных на потенциальных заказчиков обожженных окатышей из концентрата ОЖК и смеси с другими концентратами, с учетом актуальности на долгосрочную перспективу.

Расчет материальных балансов окомкования и обжига [71] проводился на основании требований потенциальных потребителей к составу обожженных окатышей. Таким образом, по результатам расчетов материальных балансов были выявлены дозировки шихтовых компонентов для тех или иных окатышей ОЖК.

3.1 Материальный баланс процесса окомкования и обжига и шихтовый состав окатышей ОЖК

Методика расчета шихты для окомкования

На стадиях, предшествующих обжигу, происходит простое смешивание компонентов шихты, при этом полагаем, что химических реакций между компонентами шихты не происходит. Итоговый химический состав сырых окатышей определяется процентным расходом шихтовых материалов и химическим составом компонентов. Например, расчет массы общего железа в шихте производится суммированием массы общего железа, содержащегося во всех компонентах шихты (концентрате, бентоните, известняке):

$$Q_{\text{шихты}}(\text{Fe}_{\text{общ}}) = Q_{\text{конц}}(\text{Fe}_{\text{общ}}) + Q_{\text{бент}}(\text{Fe}_{\text{общ}}) + Q_{\text{изв}}(\text{Fe}_{\text{общ}}), (\text{кг}) \quad (3.1)$$

, где $Q_{\text{xxx}}(\text{Fe}_{\text{общ}})$ - масса железа ($\text{Fe}_{\text{общ}}$) общего в компонентах, соответственно в шихте, концентрате, бентоните, известняке.

Массы элементов (или веществ) (в кг) определяются через содержание элементов в веществе (смеси) - ω , и общее количество вещества (смеси), в нашем случае – шихты:

$$Q_{\text{конц}}(\text{Fe}_{\text{общ}}) = \omega_{\text{конц}}(\text{Fe}_{\text{общ}}) * \gamma_{\text{конц}} * Q_{\text{шихты}}, (\text{кг});$$

$$Q_{\text{бент}}(\text{Fe}_{\text{общ}}) = \omega_{\text{бент}}(\text{Fe}_{\text{общ}}) * \gamma_{\text{бент}} * Q_{\text{шихты}}, (\text{кг});$$

$$Q_{\text{изв}}(\text{Fe}_{\text{общ}}) = \omega_{\text{изв}}(\text{Fe}_{\text{общ}}) * \gamma_{\text{изв}} * Q_{\text{шихты}}, (\text{кг});$$

$$\gamma_{\text{конц}} + \gamma_{\text{бент}} + \gamma_{\text{изв}} = 1, \quad (3.2)$$

, где $Q_{\text{шихты}}$ – масса шихты, для которой производится расчет; $\gamma_{\text{конц}}$, $\gamma_{\text{бент}}$, $\gamma_{\text{изв}}$ – содержание (доля) компонентов в шихте; $\omega_{\text{xxx}}(\text{Fe}_{\text{общ}})$ – содержание железа общего в компонентах шихты (в долях ед.).

Преобразуя (3.1) и (3.2), расчет содержания химических соединений в шихте можно производить без задания массы шихты $Q_{\text{шихты}}$, кг]:

$$\omega_{\text{шихты}}(\text{Fe}_{\text{общ}}) [\%] = \omega_{\text{конц}}(\text{Fe}_{\text{общ}}) * \gamma_{\text{конц}} + \omega_{\text{бент}}(\text{Fe}_{\text{общ}}) * \gamma_{\text{бент}} + \omega_{\text{изв}}(\text{Fe}_{\text{общ}}) * \gamma_{\text{изв}}, \quad (3.3)$$

или в более общем виде:

$$\omega_{\text{шихты}}(\text{Fe}_{\text{общ}}) [\%] = \sum_{i=1}^N \omega_i(\text{Fe}_{\text{общ}}) \times \gamma_i, \quad (3.4)$$

, где N – число компонентов в шихте; ω_i – содержание химического соединения в компоненте шихты, в данном случае $\text{Fe}_{\text{общ}}$ (в %), γ_i – доля компонента в шихте (расход в %).

Следует заметить, что химический состав определяется для сухих компонентов. В реальности все шихтовые материалы содержат воду, и дозировка и взвешивание происходит по сырому весу. Для последующего расчета фактического расхода материалов, для каждого компонента шихты необходимо задать его влажность. Содержание воды задается как относительная влажность (%), равная доле воды в общей массе.

Влажность концентрата, получаемого в результате мокрого измельчения и последующего удаления воды методом вакуумной фильтрации, значительно выше влажности добавок. Поэтому при смешивании влажного концентрата с сухими добавками общая влажность смеси (шихты) несколько ниже исходной влажности концентрата.

В некоторых случаях при окомковании в шихту добавляется вода, в таком случае влажность сырых окатышей, поступающих на обжиговую машину оказывается выше влажности шихты.

Методика расчета материального баланса процесса окомкования и обжига окатышей

Расчет материального баланса процессов обжига окатышей производится с целью [18]:

- 1) Определения величины изменения массы при обжиге (может быть отрицательной и положительной величиной в зависимости от свойств концентрата и состава шихты);
- 2) Определения химического состава обожженных окатышей;
- 3) Определению количества газов, выделяемых из слоя из-за протекания химических реакций (для оценки химического состава сбросных газов).

При обработке сырых окатышей на конвейерной обжиговой машине происходят следующие основные процессы и реакции, приводящие к изменению массы окатышей:

- Сушка окатышей с выделением влаги в виде пара;
- Разложение карбонатов (CaCO_3 , Na_2CO_3 , MgCO_3) с выделением CO_2 ;
- Окисление магнетита Fe_3O_4 ($\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$), содержащегося в шихте;
- Выделение других летучих составляющих, определяемых, как потери при прокаливании (ППП, английский термин - LOI);
- Окисление (реакции горения) свободных углерода, серы, фосфора C, S, P, с образованием газов CO_2 , SO_2 , P_2O_5 ;
- Окисление сульфидов железа FeS_2 , FeS ;

- Разложение гетитов с выделением водяного пара;
- Обратные реакции диссоциации гематит – магнетит, протекающие при высоких температурах в зоне обжига;
- Потери материала, не связанные с химическими реакциями (пылевынос).

Наибольшее влияние на изменение массы окатышей в результате химических реакций оказывает изменение массы при окислении магнетита до гематита и газо-выделения при термообработке, характеризуемые потерями при прокаливании (ППП). При расчете материального баланса окислительного обжига делаются следующие предположения и допущения:

- При прохождении окатышами обжиговой машины влага удаляется полностью. В материальном балансе масса окатышей уменьшается на массу воды, содержащейся во всех компонентах шихты. Поэтому, помимо химического состава, в балансе задается влажность и расходы компонентов шихты, а также влажность сырых окатышей, подаваемых на обжиговую машину.
- Основным источником карбонатов в шихте является концентрат, поскольку его доля в шихте обычно достигает 95-99%. Тем не менее добавки, корректирующие металлургические свойства, например, доломит или боксит, вносят значительно большие количества Ca или Mg, чем концентрат. Для расчета материального баланса полагаем, что все оксиды (CaO, MgO, Na₂O), приведенные в анализах химического состава, представляют собой 100% карбонаты (CaCO₃, MgCO₃, Na₂CO₃) независимо от того в каком компоненте шихты они содержатся.
- Окисление магнетита Fe₃O₄ (FeO*Fe₂O₃) до гематита Fe₂O₃ полагаем происходит по реакции:



- Главной неопределенностью при расчете балансов окисления окатышей является правильное определение содержания FeO в окатышах и доли его окисления.
- Железо содержится в окатышах в различных формах, а именно в форме магнетита Fe₃O₄, гематита Fe₂O₃, гетита FeO*OH, металлического железа Fемет, пирита FeS₂, пирротина FeS, а также в формах различных ферритов.
 - Для упрощения расчетов полагаем, что:
 - закись железа присутствует только в форме магнетита FeO*Fe₂O₃;
 - в химическом составе задается содержание чистого элемента - серы S, при этом полагаем, что в концентрате сера содержится в основном в виде пирита FeS₂; а основным соединением серы в добавках является оксид серы SO₃ (SO₄) и условно несвязанная сера S.
 - Fемет присутствует в шихте только при добавке в нее окалины или возврата металлизированного сырья;
 - Гетиты имеют малое содержание, крайне редко встречаются в Российских условиях. Небольшое содержание гетитов может быть задано для учета гидратной влаги.

При больших погрешностях содержание «прочих» становится отрицательным, т.е. сумма элементов в химическом составе превышает 100%. Такие химические составы

необходимо корректировать вручную, основываясь на минералогических исследованиях руды и окатышей.

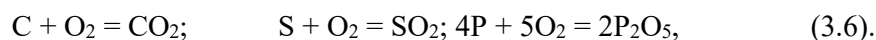
Способов корректировки несколько, самый простой – приведение к 100% в соответствии с содержанием компонента.

Однако, логичнее изменять содержание компонентов, максимально влияющих на значение «прочих», а именно – $Fe_{общ}$, FeO , S , в пределах погрешности их определения, обычно $\pm 0,1-0,2\%$. Первоначально пробуют изменять содержание компонента с самой большой погрешностью. Если это не помогает, подбирают содержание других элементов.

- Потери при прокаливании по ГОСТу (или ISO) определяют по изменению массы пробы в результате обжига на атмосферном воздухе, с последующей корректировкой на прибавку массы в результате окисления FeO до Fe_2O_3 .

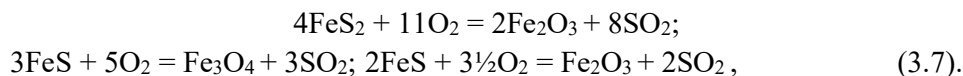
В общую величину потерь при прокаливании входят водяной пар (гидратная влага, разложение гетитов на гематит и пар), углекислый газ CO_2 входящий в состав карбонатов, а также элементы, образующие газообразные оксиды - S , C , P

- Принимаем, что в результате обжига при высоких температурах реакции горения свободных C , S , P завершаются полностью и после ряда реакций образуются соответственно CO_2 , SO_2 , P_2O_5 :



Сера, содержащаяся в форме SO_3 , при высоких температурах также разложится до SO_2

- Сульфиды железа (пирит, пирротин) при температуре выше 500° окисляются по реакциям:



В некоторой степени имеет место сульфатообразование, им пренебрегаем.

- Разложение гетитов происходит с выделением воды по следующей реакции:



- Реакциями диссоциации гематит – магнетит пренебрегаем (полагая, что эти реакции преимущественно протекают при температурах более $1350^\circ C$ (редко применяемые в практике обжиговых машин). На самом деле поскольку степень окисления задается равной меньше, чем единице, то можно считать, что оставшаяся часть образована в результате диссоциации.

В результате анализа требований потенциальных потребителей (заказчиков) к окатышам ОЖК необходимого качества, было сформировано 11 видов шихтовых составов, на основании которых реализовывались дальнейшие лабораторные и полупромышленные исследования и испытания. В таблице 3.1 представлены данные виды шихтовок (основность в виде: $B2=CaO/SiO_2$, $B3=(CaO+MgO)/SiO_2$).

Таблица 3.1 – Представленные к исследованию виды шихтовок

№ шихты	Концентрат	Основность и требование	Примечание
1	ОЖК	≈1,29 (по B2), MgO≈1,61%	Доменные окатыши для АО «Уральская сталь»
2	ОЖК	≈1,1 (по B2), MgO≈1,08%	Доменные окатыши для АО «Уральская сталь»
3	ОЖК	≈1,1 (по B2), MgO≈0,27%	Доменные окатыши для АО «Уральская сталь»
4	ОЖК	≈0,392 (по B3), SiO ₂ ≈2,51%	Окатыши на экспорт для Европы
5	ОЖК	≈1,0 (по B3), SiO ₂ ≈2,55%	Высокоосновные на экспорт
6	ОЖК	≈0,5 (по B3), SiO ₂ ≈2,52%	Окатыши для металлзации
7	ОЖК	≈0,39 (по B3 "DR-grade")	Окатыши для металлзации
8	ОЖК+Деррики Fe-70%	≈0,25 (по B3)	Неофлюсованные на экспорт
9	ОЖК+Деррики Fe-67%	≈0,15 (по B3)	Неофлюсованные на экспорт
10	ОЖК+Деррики Fe-70%	≈1,0 (по B3)	Высокоосновные на экспорт
11	ОЖК+Деррики Fe-67%	≈1,0 (по B3)	Высокоосновные на экспорт

Результаты расчета материальных балансов окомкования и обжига шихтовок №1 и №2 (таблицы 3.1) представлены ниже в таблицах 3.2 и 3.3, соответственно. Все 11 материальных балансов представлены в Приложении В.

Таблица 3.2 – Материальный баланс окомкования и обжига шихтовки №1 (таблица 3.1)

Исходные материалы (сырье)	расход %	вл-сть %	Fe _{общ}	Содержание компонентов в шихтовых составляющих, %																п.п.п.		
				FeO	FeO*O	Fe ₂ O ₃	Fe _{мер}	FeS/S	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	TiO ₂	Mn	S	C	P	Na ₂ O	K ₂ O		проч.	
Концентрат_ОЖК (ТОМС)	91,30	10,00	66,12	3,98		90,05		0,04	2,10	0,10	0,22	0,71	0,00		0,035	0,38	0,02	0,01	0,04	2,32	2,88	
Бентонит_ОЖК	0,60	6,00	3,51	0,47		4,50			60,20	15,60	2,52	3,58									13,13	6,90
Коксик	1,00														0,560	84,250					15,19	85,00
Доломит	7,10								1,82		18,90	34,20									45,08	
																					100,00	
шихта		9,95	60,38	3,63		82,24		0,04	2,41	0,18	1,56	3,10	0,00		0,038	1,187	0,02	0,01	0,04	5,55	3,52	
Результаты расчета	Масса кг		Fe_{общ}	Масса компонентов шихты, кг																п.п.п.		
Концентрат_ОЖК (ТОМС)	822,16		543,58	32,69		740,34		0,33	17,29	0,81	1,80	5,85	0,03		0,288	3,10	0,20	0,07	0,33	19,04	23,64	
Бентонит_ОЖК	5,40		0,19	0,03		0,24			3,25	0,84	0,14	0,19									0,71	0,37
Коксик	9,01														0,050	7,59					1,37	7,65
Доломит	63,94								1,16		12,08	21,87									28,82	
Сухая шихта (сухие окатыши)	900,50		543,77	32,71		740,58		0,33	21,71	1,65	14,02	27,91	0,03		0,34	10,69	0,20	0,07	0,33	49,94	31,66	
Изменение массы в результате упрочнительного обжига (Убыль (-), Прирост (+))	-27,96			-32,22		36,20		-0,27							-0,28	-10,69	-0,02				-20,67	-31,66
Обоженные окатыши	кг	872,54	543,77	0,50		776,77		0,05	21,71	1,65	14,02	27,91	0,03		0,05		0,18	0,07	0,33	29,27		
	%	100,0	62,32	0,06		89,02		0,01	2,49	0,19	1,61	3,20	0,00		0,01		0,02	0,01	0,04	3,35		

Таблица 3.3 – Материальный баланс окомкования и обжига шихтовки №2 (таблица 3.1)

Исходные материалы (сырье)	расход %	в-сть %	Fe _{общ}	Содержание компонентов в шихтовых составляющих, %																п.п.п.		
				FeO	FeO'О	Fe ₂ O ₃	Fe _{мет}	FeS/S	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	TiO ₂	Mn	S	C	P	Na ₂ O	K ₂ O		проч.	
Концентрат_ОЖК (ТОМС)	93,12	10,00	66,12	3,98		90,05		0,04	2,10	0,10	0,22	0,71	0,00	0,035	0,38	0,02	0,01	0,04	2,32	2,88		
Бентонит_ОЖК	0,60	6,00	3,51	0,47		4,50			60,20	15,60	2,52	3,58								13,13	6,90	
Известняк_ОЖК	1,00	0,20	0,25	0,01		0,35			2,42	0,60	1,01	52,40									42,60	
Коксик	1,00													0,560	84,250						15,19	85,00
Доломит	4,28								1,82			18,90	34,20								45,08	
																					100,00	
																					100,00	
шихта		9,95	61,59	3,71		83,88		0,04	2,42	0,19	1,04	2,67	0,00	0,038	1,194	0,02	0,01	0,04	4,75	3,99		
Результаты расчета		Масса кг	Fe _{общ}	Масса компонентов шихты, кг																п.п.п.		
		кг		FeO	FeO'О	Fe ₂ O ₃	Fe _{мет}	FeS/S	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	TiO ₂	Mn	S	C	P	Na ₂ O	K ₂ O	проч.		
Концентрат_ОЖК (ТОМС)		838,55	554,41	33,34		755,10		0,33	17,63	0,82	1,84	5,97	0,03		0,293	3,16	0,20	0,07	0,34	19,42	24,11	
Бентонит_ОЖК		5,40	0,19	0,03		0,24			3,25	0,84	0,14	0,19									0,71	0,37
Известняк_ОЖК		9,01	0,02	0,00		0,03			0,22	0,05	0,09	4,72									3,89	3,84
Коксик		9,01													0,050	7,59					1,37	7,65
Доломит		38,54							0,70		7,28	13,18									17,37	
Сухая шихта (сухие окатыши)		900,50	554,62	33,37		755,37		0,33	21,81	1,72	9,35	24,06	0,03		0,34	10,75	0,20	0,07	0,34	42,77	35,97	
Изменение массы в результате упрочнительного обжига (Убыль (-), Прирост (+))		-32,19		-32,86		36,92		-0,28							-0,29	-10,75	-0,02				-24,91	-35,97
Обоженные окатыши		кг	868,31	554,62	0,51	792,29		0,05	21,81	1,72	9,35	24,06	0,03		0,06		0,18	0,07	0,34	17,85		
		%	100,0	63,87	0,06	91,24		0,01	2,51	0,20	1,08	2,77	0,00		0,01		0,02	0,01	0,04	2,06		

При расчете материальных балансов окомкования и обжига окатышей из концентрата ОЖК выявлена следующая особенность. В результате расчета баланса неофлюсованных окатышей ОЖК, содержание Fe_{общ} в процентном соотношении возрастает относительно исходного, что объясняется относительно высоким содержанием в концентрате ОЖК ППП (потери при прокаливании) – 2,88% (в магнетитовом ≈ 0,6%). Например, рассмотрим результаты расчета материального баланса из Приложения В (таблица В.7). Здесь Fe_{общ} изменяется с 66,12 % в концентрате до 65,08 % в шихте (за счет разубоживания бентонитом и коксиком), но в итоге в обожжённых окатышах его содержание увеличивается до 67,28 %. Это связано с тем, что при производстве окатышей из ОЖК происходит убыль массы (горение коксика, удаление ППП), в отличие от окатышей из магнетитовых концентратов, где происходит прирост кислорода в процессе окисления и тем самым разубоживание Fe_{общ}. Потери при прокаливании концентрата ОЖК дают убыль массы 25,48 кг/т, бентонита вносится 5,04 кг/т, зола кокса составляет 1,37 кг/т, таким образом, убыль массы за счет ППП превышает прирост массы за счет бентонита и золы коксика. В итоге, в результате обжига неофлюсованных окатышей ОЖК, процентное содержание Fe_{общ} возрастает.

Исследования опыта производства окатышей из гематитовых руд за рубежом и соответствующие расчеты [63], выявили, что при наработке партий окатышей из концентрата ОЖК, являющегося гематитовым, необходимо использовать коксик.

При обжиге магнетитовых окатышей необходимо окислить магнетит кислородом, таким образом, осуществляется окислительный обжиг, а при термообработке гематитовых окатышей (окатыши из концентрата ОЖК) – осуществляется упрочняющий обжиг. Коксик компенсирует теплоту экзотермических реакций окисления магнетита, при этом способствуя образованию жидкой фазы, повышающей прочностные характеристики обожженных окатышей. В расчетах и лабораторных исследованиях был использован коксик с содержанием углерода 84,25%, применяемый в лабораторных исследованиях на АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева». Повышенная дозировка коксика 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 коксика в шихту, при его горении, образуется и увеличенное количество пор, что отрицательно влияет на прочностные характеристики окатышей. При уменьшенной дозировке коксика 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 коксика способствует увеличению удельного расхода природного газа (мазута). Таким образом, оптимальная дозировка коксика в шихту, при содержании FeO в шихте $\approx 5\%$, согласно исследованиям В.И. Клейна [59] и опыту работы зарубежных специалистов, составляет 1%.

Для окатышей проб №8-11 (таблица 3.1), дозировка коксика составила 0,5%, так как при исследовании в данных пробах в соотношении $\approx 50/50\%$ использовался гематитовый и магнетитовый концентрат.

Шихтовые составы 28-ми (25 проб + пробы №1а, №6а, №13а) лабораторных и полупромышленных партий окатышей ОЖК представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Шихтовый состав лабораторных и полупромышленных партий окатышей ОЖК

оба №	Концентрат	Основность и требование	Примечание	Содержание компонентов в шихте на сухую							
				Концентрат ОЖК, %	Концентрат-Деррикс 70%, %	Концентрат-Деррикс 67% (пром.), %	Бентонит, %	Известняк, %	Доломит, %	Коксик, %	Полимерное связующее Alcolac CS, г/10-кг шихты
1а	ОЖК	≈1,29 (по В2), MgO≈1,61%	Доменные окатыши для АО «Уральская сталь»	91,30	-	-	0,6	-	7,1	1,0	☺
1б				91,30	-	-	0,60	-	7,10	1,00	1,5
2а	ОЖК	≈1,29 (по В2), MgO≈1,61%	Доменные окатыши для АО «Уральская сталь»	93,12	-	-	0,6	1,0	4,28	1,0	1,5
2б				93,12	-	-	0,60	1,00	4,280	1,00	1,50
3а	ОЖК	≈1,1 (по В2), MgO≈0,27%	Доменные окатыши для АО «Уральская сталь»	94,60	-	-	0,60	3,80	-	1,0	1,5
3б				94,60	-	-	0,60	3,80	-	1,0	1,5
4а	ОЖК	≈1,1 (по В2), MgO≈0,27%	Доменные окатыши для АО «Уральская сталь»	98,40	-	-	0,6	-	-	1,0	☺
4б				98,40	-	-	0,60	-	-	1,00	☺
5а	ОЖК	≈0,392 (по В3), SiO ₂ ≈2,51%	Окатыши на экспорт для Европы	98,40	-	-	0,60	-	-	1,0	☺
5б				98,40	-	-	0,60	-	-	1,00	☺
6а	ОЖК	≈0,392 (по В3), SiO ₂ ≈2,51%	Окатыши на экспорт для Европы	95,57	-	-	0,60	2,83	-	1,0	1,5
6б				95,57	-	-	0,60	2,83	-	1,00	1,50
7а	ОЖК	≈1,0 (по В3), SiO ₂ ≈2,55%	Высокоосновные на экспорт	97,90	-	-	0,6	0,5	-	1,0	☺
7б				97,90	-	-	0,60	0,50	-	1,00	1,50
8а	ОЖК	≈0,5 (по В3), SiO ₂ ≈2,52%	Окатыши для металлургии	98,40	-	-	0,60	-	-	1,0	1,50
8б				98,40	-	-	0,60	-	-	1,00	1,50
9а	ОЖК	≈0,39 (по В3 "DR-grade")	Окатыши для металлургии	98,40	-	-	0,60	-	-	1,0	1,50
9б				98,40	-	-	0,60	-	-	1,00	1,50
10а	ОЖК доизмельченный	≈0,392 (по В3), SiO ₂ ≈2,51%	Окатыши на экспорт для Европы	98,4 (доизмельченный)	-	-	0,60	-	-	1,0	1,5
10б				98,4 (доизмельченный)	-	-	0,60	-	-	1,00	1,50
11а	ОЖК+Деррикс Fe-70%	≈0,25 (по В3)	Неофлосованные на экспорт	49,45	49,45	-	0,60	-	-	0,5	1,5
11б				49,45	49,45	-	0,60	-	0,50	1,50	
12а	ОЖК+Деррикс Fe-70%	≈0,25 (по В3)	Неофлосованные на экспорт	49,45	-	49,45	0,60	-	-	0,5	1,5
12б				49,45	-	49,45	0,60	-	0,50	1,50	
13а	ОЖК+Деррикс Fe-67% промышл.	≈0,15 (по В3)	Неофлосованные на экспорт	47,36	47,36	-	0,60	3,68	-	0,5	1,5
13б				47,36	47,36	-	0,60	3,68	-	0,50	1,50
14а	ОЖК+Деррикс Fe-67% промышл.	≈0,15 (по В3)	Неофлосованные на экспорт	45,82	-	45,82	0,60	6,76	-	0,5	1,5
14б				45,82	-	45,82	0,60	6,76	-	0,50	1,50

3.2 Нарботка партий сырых и сухих окатышей ОЖК в лабораторных условиях

Нарботка партий сырых окатышей осуществлялась на базе лаборатории окомкования (ЛОК) АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева».

Процесс окомкования сырых окатышей осуществляется путем накатывания шихты на зародыши [72]. В результате многократных ссыпаний и ударов друг о друга и о гарнисаж, окатыши уплотняются. При этом, более мелкие частицы располагаются между более крупными, а избыточная влага выдавливается на поверхность окатыша, в результате чего становится возможным налипание на нее неокомкованных частиц и дальнейший рост окатыша. По мере сближения зерен тонкие пленки воды между ними уменьшаются, и прочность их сцепления возрастает.

Протекание процесса окомкования и качество окатышей зависит от многих факторов, таких как соотношение компонентов, однородность шихты, ее влажность, качество шихтовых материалов и др.

Однородность шихты по крупности, влажности и равномерности распределения компонентов по всей массе шихты, достигается правильной и точной дозировкой компонентов шихты и эффективностью перемешивания. При высокой эффективности перемешивания, шихта становится более однородной, окатыши из такой шихты образуются с одинаковой скоростью, одинаковых размеров и прочностных характеристик.

Нарботка партий окатышей осуществлялась согласно шихтовым составам таблицы 3.4. Каждая партия концентрата ОЖК перед накатыванием доувлажнялась до содержания влаги $\approx 10\%$. На основании исследований [73], после перемешивания шихтовых компонентов, полученная шихта перед накатыванием подвергалась выдержке 20-30 мин, с целью позволить бентониту прореагировать с концентратом, полимером и другими шихтовыми компонентами. Добавление коксика осуществлялось на этапе перемешивания шихты. Навеска шихты в чашевый лабораторный окомкователь составляла ≈ 10 кг. Всего на лабораторном чашевом грануляторе было наработано 28 опытных партий проб окатышей из концентрата ОЖК.

В связи с высокой удельной поверхностью концентрата ОЖК - ≈ 2500 см²/г и использования в исследованиях коксика (является гидрофобным), было принято решение использовать 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 1,5г на 10 кг шихты. Использование полимерного связующего и выбор дозировки обуславливались изучением результатов исследований отечественных и зарубежных специалистов [74-79].

Для уточнения влияния полимера на качество сырых и сухих окатышей, была выполнена наработка партий окатышей без полимера у опытов №1а, №6а и №13а (таблица 3.4).

Окомкование шихты производилось в лабораторном чашевом (тарельчатом) окомкователе (рис. 3.1). Техническая характеристика данного окомкователя представлена в таблице 3.5. Получение окатышей включает в себя две стадии. На первой, получают зародыши, на второй собственно годные окатыши. Для получения зародышей используется 1/5 часть шихты, которая окомковывается в барабане-окомкователе с добавлением воды, в количестве, необходимом для формирования гранул. Полученные гранулы

классифицируют на класс 5÷8мм. Масса зародышей должна составлять 40 % от части шихты, используемой для их получения. Далее полученные годные зародыши окомковываются с оставшейся частью шихты, до получения годных окатышей. В процессе формирования окатышей, также подается необходимое количество воды. Воду следует распылять при помощи пульверизатора, для образования мелкодисперсного распыления.



Рисунок 3.1 – Лабораторный чашевый (тарельчатый) окомкователь

Таблица 3.5 – Техническая характеристика лабораторного чашевого окомкователя

Наименование параметров	Ед. изм.	Величина параметров
Диаметр тарели	мм	800
Угол наклона	град.	45
Частота вращения	об/мин	20÷25

В отличие от наработки окатышей на барабанном окомкователе [80-85], в данном случае присутствуют дополнительные управляющие воздействия процессом окомкования (угол наклона, точка подачи шихты, воды в окомкователь). На рисунке 3.2 представлена общая схема движения шихты во вращающемся окомкователе, работающем в непрерывном движении. Подаваемый материал поднимается на некоторую высоту и затем под действием собственного веса скатывается вниз. Благодаря наличию разности уровней в процессе окомкования падающий материал одновременно перемещается на некоторое расстояние вдоль его оси к разгрузочному концу. Комкуемый материал подается в зону (1) (рис. 3.2), на этом же участке образуются микрогранулы. Далее, перемещаясь в сторону разгрузки (4), происходит рост гранул до требуемого размера. В зависимости от места подачи воды в окомкователь, меняется размер получаемых гранул. При подаче воды в зону окомкования (1), происходит постоянное образование новых гранул, при этом на выходе из окомкователя среднемассовый диаметр годных гранул будет минимальным. Смещая подачу воды в сторону участка (4), среднемассовый диаметр гранул на разгрузке будет увеличиваться.

Сформированные окатыши, в течение одной минуты доупрочняются в окомкователе.

У полученных проб окатышей определяются физические свойства.

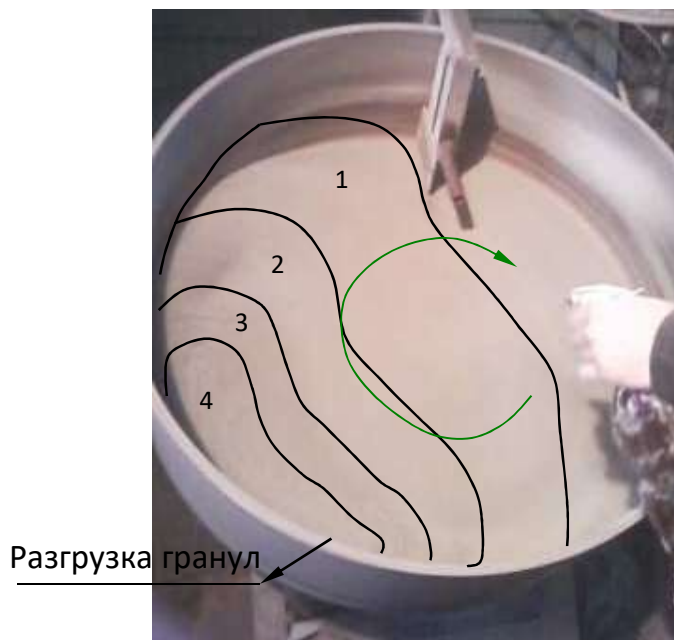


Рисунок 3.2 – Схема движения материала во вращающемся окомкователе

Определение физических свойств окатышей

Качество полученных окатышей (рис. 3.3) определяет комплекс их физических свойств. Физические свойства исследуемых окатышей:

- влажность;
- прочность на сжатие (сырых и сухих окатышей);
- пластичность;
- пористость;
- температура шока.



Рисунок 3.3 – Годные окатыши класс 12÷14мм

Для определения влажности, часть сырых окатышей высушивали до постоянного веса в сушильном шкафу (рис. 3.4) при температуре 105°C. Влажность окатышей (по ГОСТ 12764) рассчитывается по формуле (3.9). Получение сухих окатышей осуществлялось путем их высушивания в сушильном шкафу.

$$W = \frac{(m_1 - m_2)}{(m_1 - m)} \cdot 100, \% \quad (3.9)$$

, где: W – массовая доля влаги, %;
 m_1 – масса тары с навеской до высушивания, кг;
 m_2 – масса тары с навеской после высушивания, кг;
 m – масса тары, кг.



Рисунок 3.4 – Сушильный шкаф

Прочность на сжатие сырых и сухих окатышей определяется по величине воздействующей на окатыш нагрузки, зафиксированной в момент его разрушения, посредством приборов ИПГ-1М (рисунок 3.5) и рассчитывается, как среднеарифметическое из 10 определений.



Рисунок 3.5 – Приборы для определения прочности сырых и сухих окатышей

Прочность сырых окатышей на сбрасывание (пластичность) определяется по количеству сбрасываний на металлическую плиту и резину с высоты 500мм до начала его разрушения (трещинообразования) (рисунок 3.6), и рассчитывается, как среднеарифметическое из 10 определений.



Рисунок 3.6 – Определение пластичности сырых окатышей

Прочностные свойства окатышей характеризуют степень их разупрочнения в процессе транспортировки и поведение в зонах сушки обжиговой машины.

Температуру шока определяют в шахтной печи, путем опускания в нее сырых окатышей при различных температурах в рабочем пространстве печи. Температура в печи увеличивается до тех пор, пока окатыши не разрушатся. Данный опыт позволяет определить при какой шоковой температуре сырые окатыши будут разрушаться, что характеризует способность сырых окатышей выдерживать высокие температуры в зонах сушки обжиговых машин [86].

Значения пористости определяется методом гидростатического взвешивания с использованием парафина в качестве покрытия.

Методика определения пористости окатышей (ГОСТ 25732-88)

Определение пористости осуществляется путем взвешивания образцов покрытых парафином в воде с фиксацией массы на каждом этапе. Для измерения необходимо следующее оборудование и материалы: весы (с точностью измерения 0,001г), штатив и емкость для воды, нагреватель (электрическая плита), вода комнатной температуры, парафин.

Проба должна быть высушена при температуре 105°C до постоянной массы и храниться в эксикаторе. Образцы взвешиваются на весах, фиксируется масса (m_1). Далее образцы покрываются парафином, предварительно разогретым до жидкого состояния (60 – 65°C). Необходимо каждый образец полностью покрывать парафином. Покрытые парафином образцы взвешиваются, фиксируется масса (m_2). Далее образцы погружаются в воду с помощью устройства, подвешенного к весам и определяется их масса в воде (m_3). После взвешивания в воде, образцы извлекаются из воды (необходимо, чтобы вся влага с образцов стекла) и взвешиваются, фиксируется масса (m_4).

Объемная плотность железорудных образцов рассчитывается по формуле:

$$\rho_{об} = \frac{m_1}{\frac{m_4 - m_3}{\rho_B} \cdot \frac{m_2 - m_1}{\rho_P}}, \quad (3.10)$$

, где: ρ_B – плотность воды при температуре измерения, г/см³;
 ρ_P – плотность парафина, г/см³.

Пористость железорудных образцов определяется по формуле:

$$\varepsilon = \frac{\rho_{ист} - \rho_{об}}{\rho_{ист}}, \quad (3.11)$$

, где: $\rho_{ист}$ – истинная плотность исследуемых образцов, г/см³.

Следует отметить, что наработка партий окатышей на лабораторном грануляторе из концентрата ОЖК осуществляется дольше в 2 раза в сравнении с рядовым концентратом МГОК (7 минут нарабатывается партия рядового концентрата МГОК и 15 минут – концентрат ОЖК), что объясняется более тонким помолом [87] и использованием коксика в шихте. Отрицательное влияние добавления коксика в шихту объясняется его гидрофобностью. Переизмельченный концентрат при окомковании склонен к образованию новых зародышей вместо роста уже имеющихся, таким образом, образуются окатыши похожие визуально на сростки зародышей, что является не кондицией (браком). В нашем случае образования сростков зародышей не наблюдалось, но тонина помола концентрата ОЖК относительно высока.

Физические свойства наработанных партий сырых и сухих окатышей ОЖК представлены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Физические свойства сырых и сухих окатышей ОЖК

Проба №	Концентрат	Основность и требования	Примечание	Содержание компонентов в шихте на сухую							Физические свойства сырых окатышей					Физические свойства сухих окатышей		
				Концентрат ОЖК, %	Концентрат Деррикс 70%, %	Концентрат Деррикс 67% (пром.), %	Бентонит, %	Известняк, %	Доломит, %	Коксик, %	Полпирное-связующее: Alcosac CS, г/10 кг-шихты	Влажность W, %	Прочность на сжатие P _{сж} , кг/ок	Прочность на сбрашивание, раз/ок		Температура шока, °C	Прочность на сжатие P _{сж} , кг/ок	Пористость, %
														На металл (500мм)	На резину (500мм)			
1а	ОЖК	≈1,29 (по В2), MgO≈1,61%	Доменные окатыши для АО «Уральская сталь»	91,30	—	—	0,6	—	7,1	1,0	—	8,9	1,4	1,6	4,5	652	4,2	31,2
1б				91,30	—	—	0,60	—	7,10	1,00	1,5	9,3	2,0	2,0	4,5	702	4,4	32,2
2а	ОЖК	≈1,29 (по В2), MgO≈1,61%	Доменные окатыши для АО «Уральская сталь»	93,12	—	—	0,6	1,0	4,28	1,0	—	9,6	1,5	1,5	3,4	702	5,3	36,8
3а				93,12	—	—	0,6	1,0	4,28	1,0	—	9,6	1,5	1,5	3,4	702	5,3	36,8
4а	ОЖК	≈1,1 (по В2), MgO≈0,27%	Доменные окатыши для АО «Уральская сталь»	94,60	—	—	0,60	3,80	—	1,0	—	9,7	1,5	2,5	6,7	677	4,3	34,1
5а				94,60	—	—	0,60	3,80	—	1,0	—	9,7	1,5	2,5	6,7	677	4,3	34,1
6а	ОЖК	≈0,392 (по В3), SiO ₂ ≈2,51%	Окатыши на экспорт для Европы	98,40	—	—	0,6	—	—	1,0	—	9,0	1,1	1,1	2,5	677	2,9	29,0
7а				98,40	—	—	0,60	—	—	1,0	—	9,6	1,5	2,2	4,8	685	4,3	34,1
8а	ОЖК	≈0,392 (по В3), SiO ₂ ≈2,51%	Окатыши на экспорт для Европы	95,57	—	—	0,60	2,83	—	1,0	—	9,4	1,5	2,5	6,6	633	4,4	31,2
9а				95,57	—	—	0,60	2,83	—	1,0	—	9,4	1,5	2,5	6,6	633	4,4	31,2
10а	ОЖК	≈1,0 (по В3), SiO ₂ ≈2,55%	Высокоосновные на экспорт	97,90	—	—	0,6	0,5	—	1,0	—	8,8	1,2	1,6	3,0	677	2,8	28,3
11а				97,90	—	—	0,60	0,50	—	1,0	—	9,8	1,5	1,6	4,0	702	5,7	36,4
12а	ОЖК	≈0,39 (по В3 "DR-grade")	Окатыши для металлургического	98,40	—	—	0,60	—	—	1,0	—	9,6	1,45	2,2	5,0	702	5,4	33,7
13а				98,40	—	—	0,60	—	—	1,0	—	9,6	1,45	2,2	5,0	702	5,4	33,7
13б	ОЖК	≈0,5 (по В3), SiO ₂ ≈2,52%	Окатыши для металлургического	98,4	—	—	0,60	—	—	1,0	—	9,6	1,25	1,6	3,6	627	2,5	34,4
14а				98,4	—	—	0,60	—	—	1,0	—	9,6	1,25	1,6	3,6	627	2,5	34,4
15а	ОЖК+Деррикс Fe-70%	≈0,25 (по В3)	Неофлюсованные на экспорт	49,45	49,45	—	0,60	—	—	0,5	—	9,7	1,45	1,9	5,8	677	2,8	32,9
16а				49,45	49,45	—	0,60	—	—	0,5	—	9,7	1,45	1,9	5,8	677	2,8	32,9
17а	ОЖК+Деррикс Fe-67% промашле	≈0,15 (по В3)	Неофлюсованные на экспорт	49,45	—	49,45	0,60	—	—	0,5	—	9,7	1,45	2,2	5,8	694	3,2	32,5
18а				49,45	—	49,45	0,60	—	—	0,5	—	9,7	1,45	2,2	5,8	694	3,2	32,5
19а	ОЖК+Деррикс Fe-67% промашле	≈0,15 (по В3)	Неофлюсованные на экспорт	47,36	—	—	0,60	3,68	—	0,5	—	9,7	1,4	2,3	6,3	602	5,5	31,3
20а				47,36	—	—	0,60	3,68	—	0,5	—	9,7	1,4	2,3	6,3	602	5,5	31,3
21а	ОЖК+Деррикс Fe-70%	≈1,0 (по В3)	Высокоосновные на экспорт	45,82	—	45,82	0,60	6,76	—	0,5	—	9,9	1,4	3,0	7,4	677	5,8	31,9
22а				45,82	—	45,82	0,60	6,76	—	0,5	—	9,9	1,4	3,0	7,4	677	5,8	31,9

3.3 Анализ физических свойств сырых и сухих окатышей ОЖК

Неоднократная наработка партий сырых окатышей одинаковых шихтовых составов осуществлялась с целью дальнейшего проведения полупромышленных испытаний по их термообработке на действующей обжиговой машине при различных ее производительностях, для выбора той, при которой обожженные окатыши будут удовлетворять необходимыми качественными показателями для потенциальных потребителей. Таким образом, в таблице 3.6 представлены усредненные показатели качества (физические свойства) сырых и сухих окатышей ОЖК единого шихтового состава.

Пробы №1 и 1а, №6 и 6а, №13 и 13а имеют одинаковые шихтовые составы, соответственно, но отличаются наличием в шихте органического полимерного связующего «Alcotac CS». Как упоминалось ранее, для уточнения влияния полимера на качество сырых и сухих окатышей, была выполнена наработка партий окатышей без полимера у опытов №1а, №6а и №13а.

Для упрощения анализа влияния полимерного связующего целесообразно усреднить качественные показатели проб №1а, 6а, 13а и №1, 6, 13, соответственно. В таблице 3.7 представлены усредненные качественные показатели проб окатышей ОЖК с использованием органического полимерного связующего и без него.

Таблица 3.7 - Качественные показатели сырых и сухих окатышей ОЖК с применением полимерного связующего и без него

Проба №	Полимерное связующее Alcotac CS, г/10 кг шихты	Физические свойства сырых окатышей					Физические свойства сухих окатышей		
		Влажность W, %	Прочность на сжатие $R_{сыр}$, кг/ок	Прочность на сбрасывание, раз/ок			Температура шока, °С	Прочность на сжатие $R_{сух}$, кг/ок	Пористость, %
				На металл (500мм)	На резину (500мм)	Среднее значение			
1а, 6а, 13а	0	8,9	1,238	1,4	3,3	2,4	668,7	3,3	29,5
1, 6, 13	1,5	9,6	1,7	1,9	4,4	3,2	696,4	4,8	34,2

Необходимо отметить, что прочность на сжатие сырых окатышей опытов 1а, 6а и 13а, полученных без полимера составила в среднем 1,24 кг/ок, а с добавлением полимера – 1,7 кг/ок (таблица 3.7). Показатель прочности сырых окатышей характеризует способность нижних слоев выдерживать массу верхних слоев, при этом не разрушаясь, в технологической зоне сушки 1 обжиговой машины. То есть, добавление полимерного связующего позволило увеличить показатель прочности сырых окатышей на 38%. Анализ таблицы 3.7 показывает, что окатыши, полученные без добавления полимерного связующего, обладают невысокой прочностью на сбрасывание, в среднем: на металл – 1,4 раз, на резину – 3,3 раз. При этом влажность полученных окатышей без полимера – 8,9%. 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 до 9,6%, что на 0,68% выше чем у окатышей без использования полимера. Данное объясняется тем,

что полимер увеличил способность окатыша насыщаться влагой. Как следствие, с увеличением влажности окатыша увеличивается и пластичность (прочность на сбрасывание), что подтверждает результаты исследований [88-92]. Пластичность окатышей с добавлением полимера увеличилась до: на металл – 1,9 раз, на резину – 4,4 раз, то есть с добавлением полимера прочность на сбрасывание на металл увеличилась на 35,7%, на резину – на 33,3%. Такой показатель качества сырых окатышей как прочность на сбрасывание (пластичность), характеризует способность сырого окатыша выдерживать перегрузки не разрушаясь, с окомкователя на конвейер, с конвейера на конвейер, с конвейера на роликовый питатель и так далее [93]. При частичном взаимодействии полимера с бентонитом (добавление полимера в шихту), прочность сухих окатышей увеличилась с 3,3 кг/ок до 4,8 кг/ок, то есть на 45%. (таблица 3.7). Прочность сухих окатышей является показателем способности сухих окатышей низа слоя, после зоны сушки, выдерживать нагрузки верхних слоев, во избегании разрушения низа слоя, что может привести к «запиранию» слоя окатышей и отсутствию прососа.

Количество добавляемого бентонита не менялось и составляло 0,6%. При этом, в окатышах с полимером увеличивается пористость сухих окатышей (таблица 3.7), при одновременном повышении прочности сухих окатышей, 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 (доли пустот). При этом за счет более высокой прочности сухих окатышей при добавлении полимера повышается температура шока окатышей (таблица 3.7), что дает предпосылки для интенсификации температурного режима в зонах сушки прососом и зоне нагрева.

Важно отметить, что в промышленных условиях физические показатели качества сырых окатышей выше чем в лабораторных, данное обусловлено объемами шихты в окомкователе и нагрузкой, влияющими на упрочнение. Так, после анализа статистических данных было выявлено, что, например, прочность на сбрасывание у рядовых окатышей, отобранных с промышленных барабанов-окомкователей (после грохота – перед падением на конвейер) выше в 1,2-1,25 раз, чем у рядовых окатышей, полученных в лабораторных условиях. Таким образом, необходимо отметить, что среднее значение пластичности у полученных лабораторных окатышей с добавлением полимера, в промышленных условиях будет более чем удовлетворительным.

Из выше изложенного целесообразно сделать вывод о положительном эффекте от использования полимерного связующего, способствующего повышению качества сырых и сухих окатышей из концентрата ОЖК.

Как было описано ранее, с целью оценки влияния частичной ликвидации гидрофобной поверхности (как результата флотационного обогащения) зерен концентрата ОЖК путем его доизмельчения, на качество окатышей, было принято решения доизмельчить концентрат ОЖК и дополнительно использовать его в исследованиях. Таким образом, целесообразно провести анализ качественных показателей сырых и сухих окатышей пробы №17 (таблица 3.6) из концентрата ОЖК доизмельченного. Шихтовый состав данной пробы идентичен составу проб №6, 7 и 8. Как видно из таблицы 3.6, качественные показатели окатышей одинакового состава из концентрата ОЖК доизмельченного ниже чем из концентрата ОЖК. Например, средняя прочность на сбрасывание (пластичность) у окатышей из концентрата ОЖК доизмельченный – 2,6 раз/ок, когда у окатышей из

концентрата ОЖК – 3,5 раз/ок; прочность на сжатие сухих окатышей из концентрата ОЖК доизмельченного – 2,5 кг/ок, когда у окатышей из концентрата ОЖК – 4,3 кг/ок Данное объясняется более сложным процессом окомкования (низкой степенью комкуемости) концентрата ОЖК доизмельченного, в силу его высокой удельной поверхности 2800 см²/г относительно концентрата ОЖК – 2500 см²/г. Следовательно, имеет место вывод о нецелесообразности доизмельчения концентрата ОЖК; его удельная поверхность оценивается как предельная, при этом, дальнейшее доизмельчение приводит к ухудшению качественных показателей сырых и сухих окатышей.

В промышленных условиях при внедрении тех или иных концентратов, несомненно, необходимо обрабатывать технологию производства сырых окатышей в зависимости от требуемого годного класса и качественных показателей. Лабораторные исследования позволяют подтвердить принципиальную возможность наработки партий сырых окатышей требуемого качества.

3.4 Выводы по главе 3

1. Исследования материальных балансов позволили рассчитать дозировки шихтовых компонентов в зависимости от требований потенциальных заказчиков к химическому составу обожженных окатышей.
2. Расчет каждого материального баланса окомкования и обжига позволяет рассчитать выход обожженных окатышей из сырых, что позволяет прогнозировать нагрузки на окомкователи и обжиговую машину.
3. Исследования материальных балансов окомкования и обжига окатышей ОЖК позволили выявить повышение содержания Feобщ в обожженных окатышах, относительно сырых, что объясняется высоким содержанием в составе концентрата ОЖК показателя ППП (потери при прокаливании) и отсутствием насыщения окатышей кислородом, так как отсутствует окисление магнетита.
4. Оптимальная дозировка коксика в шихту при содержании FeO в шихте ≈5%, согласно [63] и опыту зарубежных предприятий, составляет 1%. Добавление коксика осуществлялось на этапе перемешивания шихты.
5. Использование полимерного связующего позволило повысить качественные характеристики сырых и сухих окатышей.
6. Нарботка партий окатышей на лабораторном грануляторе из концентрата ОЖК осуществляется дольше в 2 раза в сравнении с рядовым концентратом МГОК (7 минут нарабатывается партия рядового концентрата МГОК и 15 минут – концентрат ОЖК), что объясняется более тонким помолом [82, 87], высокой гигроскопичностью при плохой комкуемости [94] и использованием коксика в шихте.
7. Доизмельчение концентрата ОЖК нецелесообразно, в связи с его относительно высокой удельной поверхности (≈2500 см²/г), при этом, дальнейшее доизмельчение приводит к ухудшению качественных показателей сырых и сухих окатышей.

4 ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОМЫШЛЕННЫХ ОБОЖЖЕННЫХ ОКАТЫШЕЙ ОЖК И РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО ИХ ПРОИЗВОДСТВУ

Для определения качественных показателей окатышей ОЖК в условиях, характерных для обжиговых конвейерных машин, проводились их полупромышленные испытания. Нарботанные в лабораторных условиях партии сырых окатышей ОЖК подвергались термообработке в вертикальных слоевых пробниках на действующей обжиговой машине №2 (ОМ №2) ФОК АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева» при различных производительностях обжиговой машины (ОМ). Целью данных исследований было выявление максимально возможной производительности ОМ№2, при которой качество обожженных окатышей будет удовлетворять требованиям потенциальных потребителей, и подготовка исходных данных для расчета на математической модели ООО «НПВП ТОРЭКС» и моделирования режимов термообработки окатышей из концентрата ОЖК на обжиговых машинах ФОК АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева» с целью получения технологических параметров работы обжиговых машин.

Термообработка окатышей одинакового шихтового состава в большинстве случаев осуществлялась неоднократно, что объясняется подбором производительности ОМ и уточняющими исследованиями. Изменение производительности позволяет менять время термообработки окатышей. Для каждой производительности подбиралось оптимальное соотношение высоты слоя окатышей и скорости обжиговой машины.

В процессе термообработки фиксировались показания КИП и температурный режим. У проб обожженных окатышей определялись физические свойства и химический состав.

Как упоминалось в главе 3.3, наработка партий окатышей проб № 1а, 6а и 13а осуществлялась без добавления полимера, при этом было выявлено, что отсутствие полимера снижает качество сырых и сухих окатышей. Данные показатели имеют принципиальное значение, так как невысокая прочность сырых окатышей способствует разрушению нижних слоев в зоне сушки 1 обжиговой машины; пластичность сырых окатышей характеризует их способность выдерживать перегрузки в промышленных условиях. В связи с данными выводами было принято решение не включать пробы № 1а, 6а и 13а в полупромышленные исследования.

4.1 Исследование полупромышленных испытаний по получению обожженных окатышей ОЖК

Нарботка партий обожженных окатышей осуществлялась следующим образом. Каждую партию сырых окатышей класса 9-16 мм и массой ≈ 10 кг, загружали в вертикальные пробники из жаропрочной стали (далее по тексту «пробники»), изображенные на рисунке 4.1.



Рисунок 4.1 – Вертикальные пробники

Предварительно установив необходимый режим обжига (производительность, высота слоя, скорость ОМ и т. д.) на ОМ№2, данные пробники устанавливались на окатыши постели в загрузочной части ОМ и далее, находясь в слое окатышей, подвергались термообработке. На рисунке 4.2 представлена схема обжиговой тележки с окатышами и установленного на ней слоевого пробника с лабораторными окатышами.

Параллельно с установкой пробников осуществлялась фиксация показаний КИП ОМ и инструментально определялась температура в ОМ на границе «слой-постель» и «верх слоя» посредством термопар и термологгера (представилось возможным осуществить не на всех режимах термообработки). Инструментальное определение температурного режима термообработки осуществлялось по методике ООО «НПВП ТОРЭКС». Установка термопар и термологгера представлена на рисунке 4.3.

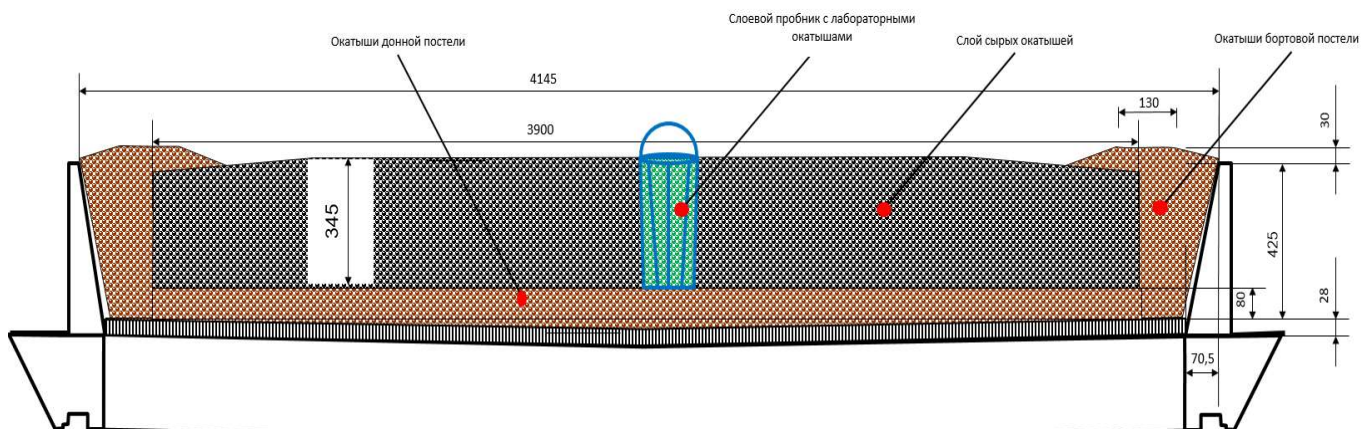


Рисунок 4.2 – Схема установки слоевого пробника с лабораторными окатышами на обжигую тележку

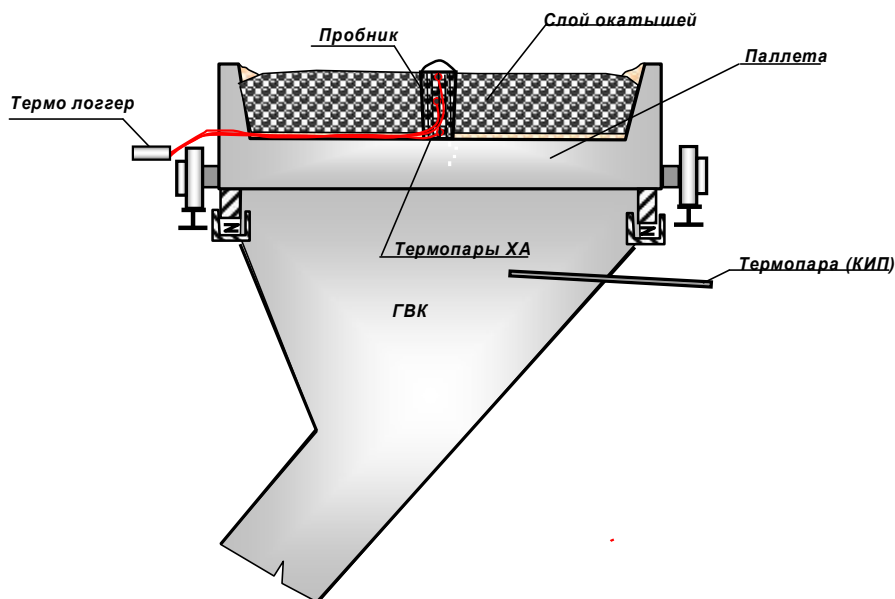


Рисунок 4.3 – Установка термопар и термо логгера

Термологгер состоит из гибкой термопары ТХА, коробки с термостойкой футеровкой и непосредственно платы с батарейками, фиксирующей значение температуры от термопары ТХА каждую секунду. Прибор термологгер создан сотрудниками ТОРЭКС. На данном приборе есть возможность измерения нескольких температур, соответственно при установке нескольких термопар на обжиговую машину. В данных исследованиях устанавливалось две термопары: на верх слоя окатышей и на границу «слой сырых окатышей – слой окатышей постели». Предварительно к плате термологгера подключались термопары, далее плата термологгера помещалась в термостойкую коробку, затем, без остановки обжиговой машины коробка устанавливалась на обжиговую тележку, как показано на фотографиях рисунка 4.3. Для размещения концов термопар (спаи) на необходимые горизонты слоя, необходимо было залезть под роликовый питатель обжиговой машины на донную постель и установить спаи термопар на верх слоя и на границу «слой-постель». Гибкая термопара ТХА, плата термологгера и термостойкая коробка изображены на рисунке 4.4. Далее фиксировалось время, при котором термологгер находился у той или иной газо-воздушной камеры. В конце обжиговой машины, термологгер извлекался и с платы, посредством кабеля, снимались показания температур. Затем по температурам и зафиксированному времени строились термограммы, представленные на рисунках 4.6 – 4.8. По данным показателям оценивалась непосредственно сама температура термообработки, скорости нагрева и охлаждения, длительность выдержки того или иного горизонта слоя окатышей при высоких температурах, что в дальнейшем исследовании способствовало корректировке производительности обжиговой машины.



Рисунок 4.4 – Составляющие измерительного прибора термолотгер

В зоне охлаждения 2, перед разгрузкой окатышей, пробники извлекались.

У каждой пробы из пробников определялись химический состав и следующие физические свойства: прочность на сжатие (ISO 4700-83), пористость (ГОСТ 25732-88), прочность на удар и истирание (ГОСТ 15137). Прочность на сжатие обожженных окатышей ОЖК каждой пробы определялась на разрывной машине ИС-10 (рисунок 4.5).



Рисунок 4.5 – Разрывная машина ИС-10 (ISO 4700-83)

Температурные режимы термообработки, определенные посредством инструментальных замеров прибором термолотгер при различных производительностях обжиговой машины №2, представлены на рисунках ниже. На рисунке 4.5а представлена технологическая схема обжиговой машины №2 АО «Михайловский ГОК». Как известно, на обжиговой машине, при нормальной работе, меньшей прочностью обладают окатыши низа слоя, то есть, при всех прочих равных условиях, чем выше прочность низа слоя окатышей, тем выше прочность окатышей в среднем по слою. Высокотемпературная термообработка окатышей на обжиговой машине осуществляется прососом теплоносителя через верх слоя окатышей к низу слоя, следовательно, низ слоя испытывает относительный дефицит количества теплоты (в сравнении с верхом слоя), поэтому показатель прочности окатышей нижних горизонтов слоя меньше показателя прочности окатышей верхних горизонтов. Таким образом, индикатором качества обожженных окатышей низа слоя является время выдержки при температуре 1000°C на границе «слой-постель» (граница между окатышами донной постели и сырыми окатышами); чем длительнее выдержка, тем выше прочность окатышей [19]. Увеличение производительности действующей обжиговой машины (увеличение скорости обжиговой машины), подразумевает уменьшение времени пребывания слоя окатышей в технологических зонах. Следовательно, при увеличении производительности ОМ, уменьшается время выдержки низа слоя окатышей.

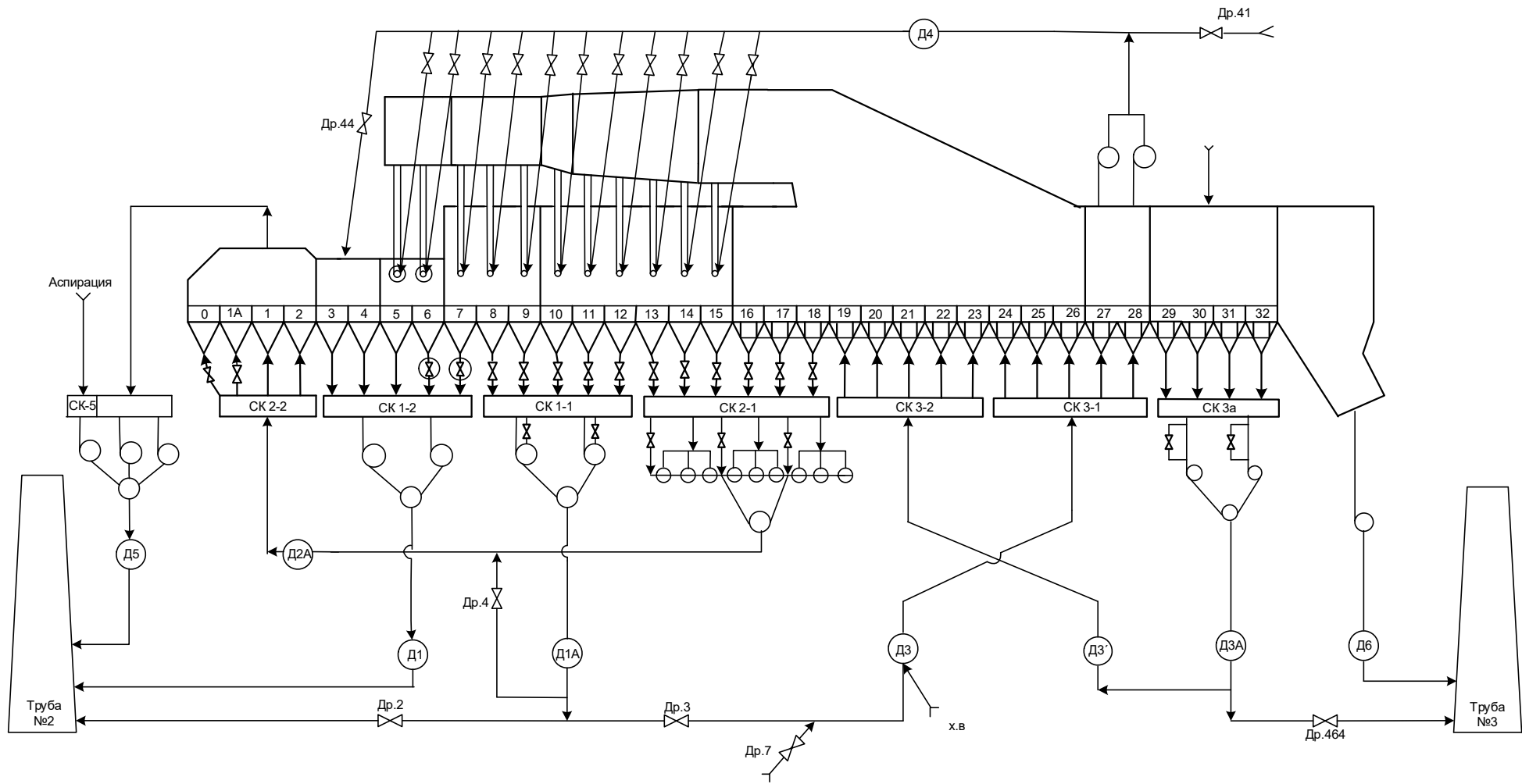


Рисунок 4.5а – Технологическая схема обжиговой машины №2 ОК 520 АО «Михайловский ГОК»

На рисунках 4.6 – 4.8 изображены графики термообработки окатышей ОЖК на производительности 450 т/ч, 570 т/ч, 618 т/ч, соответственно.

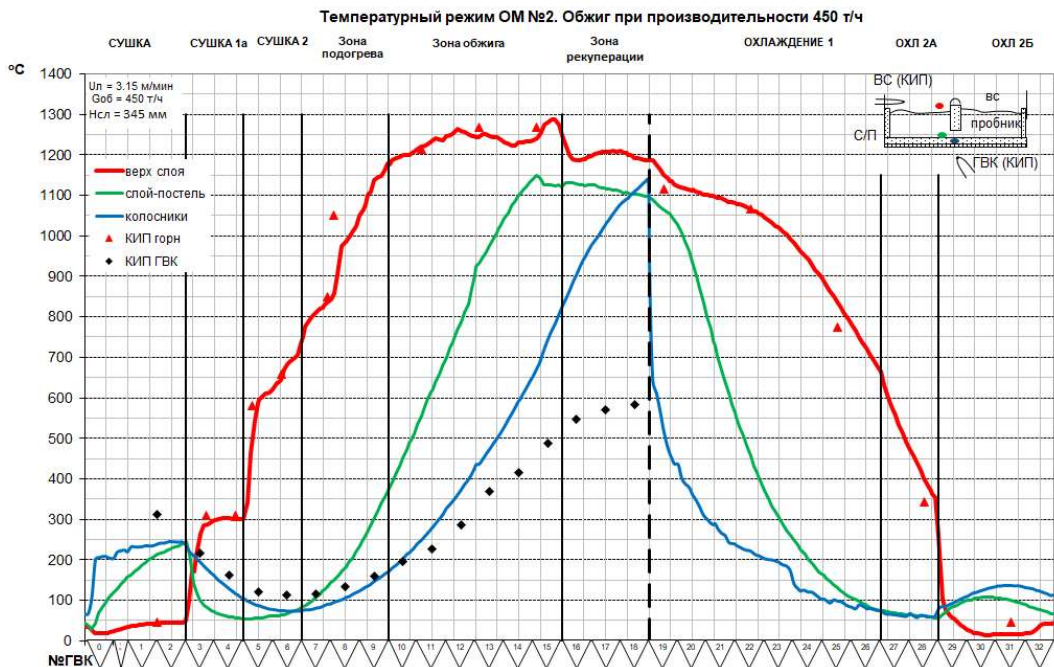


Рисунок 4.6 – Температурный режим обжига окатышей ОЖК на ОМ №2 при полупромышленных исследованиях на производительности 450 т/ч

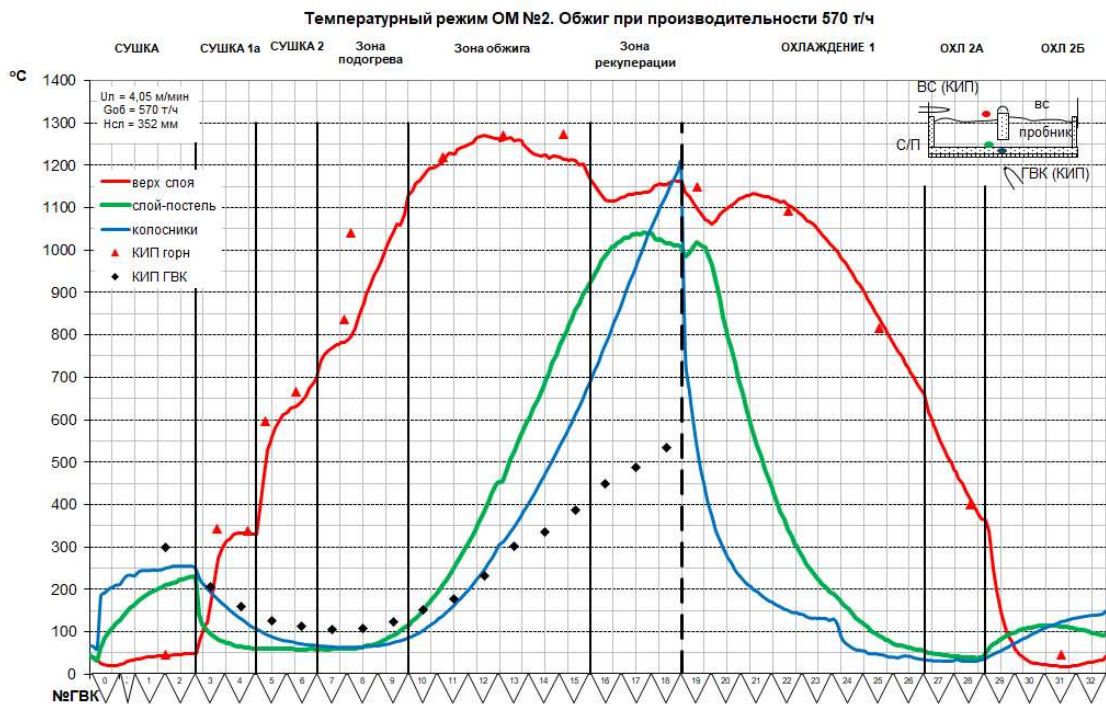


Рисунок 4.7 - Температурный режим обжига окатышей ОЖК на ОМ №2 при полупромышленных исследованиях на производительности 570 т/ч

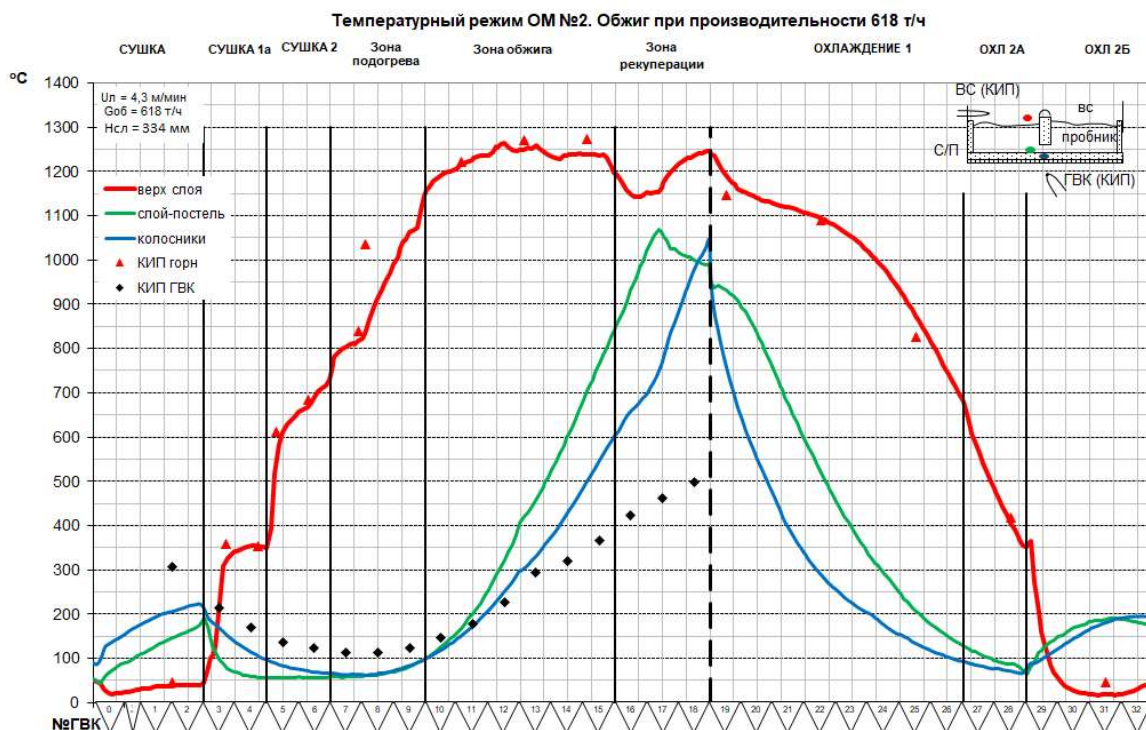


Рисунок 4.8 - Температурный режим обжига окатышей ОЖК на ОМ №2 при полупромышленных исследованиях на производительности 618 т/ч

Анализ термограмм на рисунке 4.6 позволяет заключить, что при производительности ОМ №2 450т/ч и высоте слоя сырых окатышей 345 мм, скорость обжиговых тележек составила 3,15 м/мин. При анализе термограммы «слой-постель» выявлено, что выдержка окатышей низа слоя $\geq 1000^{\circ}\text{C}$ составила 7,6 мин. При производительности 570 т/ч (рисунок 4.7) высота слоя сырых окатышей – 352 мм, скорость ОМ – 4,05 м/мин, при этом выдержка окатышей низа слоя $\geq 1000^{\circ}\text{C}$ составила 2,96 мин. При производительности 618 т/ч (рисунок 4.8) высота слоя сырых окатышей – 334 мм, скорость ОМ – 4,3 м/мин, при этом выдержка окатышей низа слоя $\geq 1000^{\circ}\text{C}$ составила 1,86 мин. Данные зависимости, представленные на рисунке 4.9, позволили разработать последовательность проведения полупромышленных исследований.

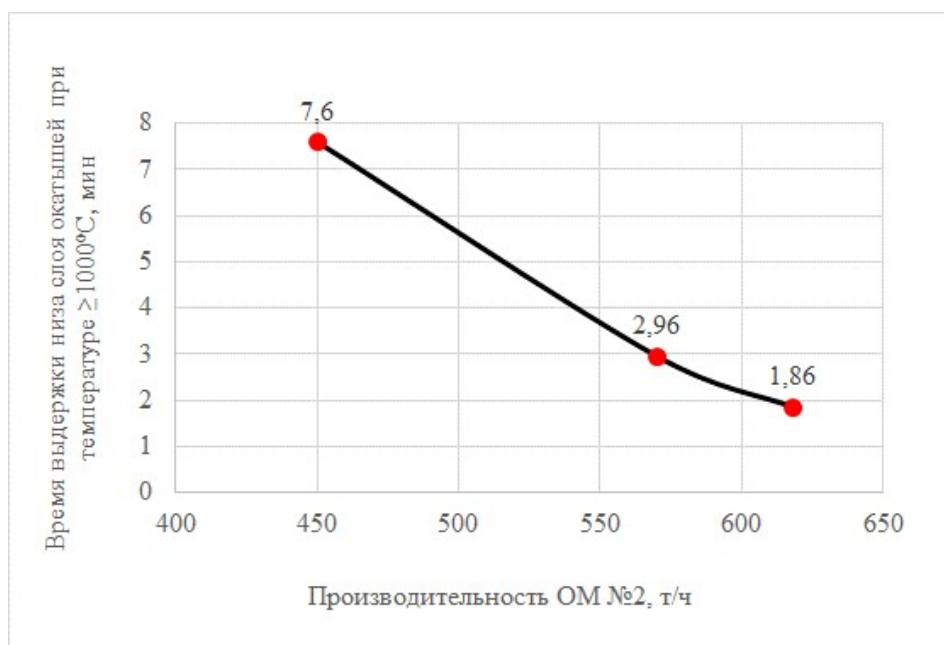


Рисунок 4.9 – Зависимость времени выдержки низа слоя окатышей при температуре $\geq 1000^{\circ}\text{C}$ от производительности обжиговой машины

Таким образом, для выявления максимальной производительности для окатышей ОЖК представленных шихтовых составов, при полупромышленных исследованиях, с целью расчетов на математической модели, была подобрана последовательность проведения полупромышленных исследований. Последовательность полупромышленных исследований заключалась в следующем: испытания по термообработке окатышей ОЖК каждого шихтового состава в вертикальных пробниках на действующей обжиговой машине №2 начинались с предполагаемой оптимальной производительности для каждой партии окатышей ОЖК. Оптимальная производительность устанавливалась исходя из опыта производства окатышей на данной обжиговой машине. Далее, в результате анализа качественных показателей полученных обожженных окатышей ОЖК принималось решение о повторной термообработке той или иной партии сырых окатышей ОЖК, но либо при сниженной производительности ОМ №2, либо при повышенной. То есть, например, если партия сырых окатышей ОЖК прошла термообработку в слоевом пробнике на обжиговой машине №2 при ее производительности 618 т/ч и прочность на сжатие обожженных окатышей ОЖК составила 230 кг/ок, а требуемая потенциальным потребителем прочность на сжатие должна составлять 250 кг/ок, то принималось решение о термообработке сырых окатышей того же шихтового состава, но на сниженной, относительно 618 т/ч, производительности, например, при 570 т/ч. Данная последовательность проведения полупромышленных исследований по получению обожженных окатышей ОЖК позволила в дальнейшем рассчитать представительные коэффициенты адаптации математической модели под производство окатышей ОЖК на обжиговых машинах ФОК (фабрика окомкования) АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева» на теоретически максимально возможных производительностях.

4.2 Параметрическая идентификация экспериментальных показателей прочности обожженных окатышей к условиям функционирования обжиговой машины

Основным показателем качества обожженных окатышей является прочность на сжатие, при этом, например, содержание FeO в окатышах коррелируется с прочностью окатышей: высокая прочность, свидетельствует о завершенности окислительных и упрочняющих процессов.

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. То есть, вертикальный пробник создает улучшающие условия для теплообмена за счет наличия прутков (стенок), вдоль которых скорость фильтрации незначительно выше и конвективный теплообмен протекает эффективней [95, 96]. 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, автором 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» (методика и расчет были разработаны автором непосредственно как личный вклад в работу). 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

Для расчетов были отобраны пробы обожженных окатышей в зоне охлаждения ОМ №2 в следующих точках:

- верх;
- середина;
- низ;
- донная постель;
- бортовая постель лево;
- бортовая постель право;
- У всех отобранных проб окатышей определялась прочность на сжатие. Таким образом, представились следующие показатели:
- средняя прочность проб «верх», «середина» и «низ» = «а» (кг/ок);
- прочность донной постели = «b» (кг/ок);
- средняя прочность проб «бортовая постель лево» и «бортовая постель право» = «с» (кг/ок).

Путем расчета площади геометрических фигур в профиле слоя окатышей на обжиговой тележке, определялись доли окатышей бортовой постели и донной постели от

общего количества окатышей на обжиговой тележке из бункера-выравнивателя температур (на выходе с ОМ).

На рисунке 4.9а изображен чертеж обжиговой тележки с размерами. На рисунке 4.9б представлена схема профиля обжиговой тележки с сырыми окатышами и окатышами постели, с размерами. Размеры профиля слоя получены путем расчета средних значений по многочисленным измерениям. Размеры на рисунках 4.9а и 4.9б представлены в миллиметрах (мм).

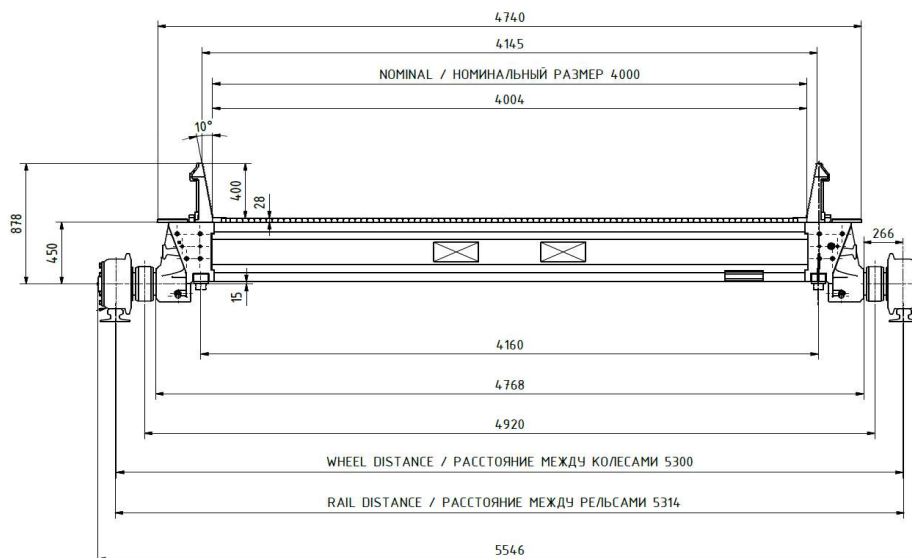


Рисунок 4.9а – Чертеж обжиговой тележки

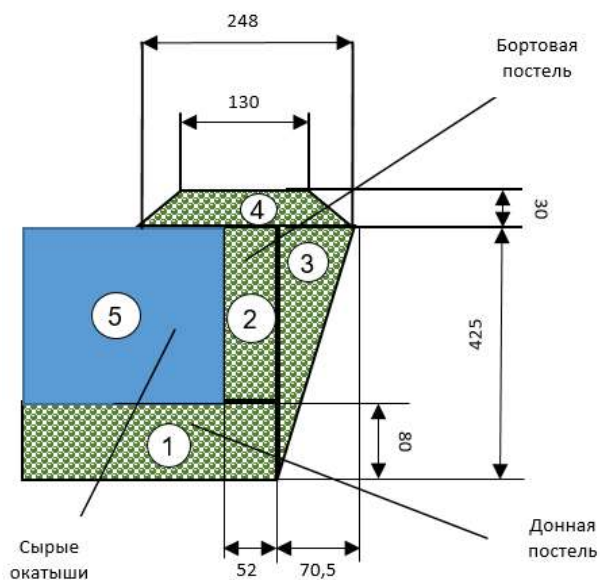


Рисунок 4.9б – Схема профиля обжиговой тележки с сырыми окатышами и окатышами постели

Как видно из рисунка 4.9б, для расчета доли окатышей донной и бортовой постели были определены геометрические фигуры:

«1» – окатыши донной постели представлены в виде прямоугольника;

«2», «3», «4» - окатыши бортовой постели представлены в виде прямоугольника, треугольника и трапеции, соответственно;

«5» - сырые окатыши представлены в виде прямоугольника.

Далее целесообразно ввести следующие значения:

- доля окатышей донной постели = «х»;
- доля окатышей бортовой постели = «у».

Путем расчета площадей фигур рисунка 4.9б рассчитываются значения «х» и «у». Необходимо отметить, что на рисунке 4.9б представлена одна сторона обжиговой тележки, следовательно, площади фигур «2», «3» и «4» необходимо умножить на 2.

Расчет площадей:

Площадь фигуры «1»: $S_1 = 80 \cdot 4004 = 320320$ (мм²);

Площадь фигуры «2»: $S_2 = 52 \cdot 345 \cdot 2 = 35880$ (мм²);

Площадь фигуры «3»: $S_3 = 0,5 \cdot 70,5 \cdot 425 \cdot 2 = 29962,5$ (мм²);

Площадь фигуры «4»: $S_4 = (248 + 130) \cdot 0,5 \cdot 30 \cdot 2 = 11332,7$ (мм²);

Площадь фигуры «5»: $S_5 = 345 \cdot 3900 = 1345500$ (мм²);

Сумма площадей:

$S = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5 = 320320 + 35880 + 29962,5 + 11332,7 + 1345500 = 1742995,2$ (мм²).

Далее рассчитываются «х» и «у»:

$x = S_1 / S = 320320 / 1742995,2 = 0,18378$;

$y = (S_2 + S_3 + S_4) / S = (35880 + 29962,5 + 11332,7) / 1742995,2 = 0,0443$.

Для дальнейших расчетов, примем усредненные по многочисленным данным значения:

$a = 260$ (кг/ок);

$b = 220$ (кг/ок);

$c = 235$ (кг/ок).

Далее рассчитываем прочность окатышей на выходе из ОМ («d»), по формуле:

$$d = ((1-x-y) \cdot a) + (b \cdot x) + (c \cdot y), \text{ кг/ок} \quad (4.1).$$

Подставляя числовые значения, получим:

$$d = ((1-0,18378-0,0443) \cdot 260) + (220 \cdot 0,18378) + (235 \cdot 0,0443) = 251,54 \text{ (кг/ок)}.$$

Далее рассчитываем «коэффициент постели»:

$$k_{\text{пост}} = d/a, \quad (4.2).$$

Подставляя числовые значения, получим:

$$k_{\text{пост}} = 251,54 / 260 = 0,9675.$$

Расчет коэффициента «пристеночного» эффекта пробника

В пробник загрузались окатыши с роликового питателя и обжигались на ОМ. У данного пробника определяли прочности окатышей «верх», «середина» и «низ». Средняя прочность проб «верх», «середина» и «низ» = «z» (кг/ок). Для дальнейших расчетов, примем усредненное по многочисленным данным значение:

$z = 280$ (кг/ок).

Имея показатель «a» и «z», можно вычислить значение «коэффициента пристеночного эффекта пробника»:

$$k_{\text{п.э.}} = a/z, \quad (4.3).$$

Подставляя числовые значения, получим:

$$k_{п.э.} = 260 / 280 = 0,9286.$$

Расчет коэффициента «лабораторный пробник-пробник окатышей с роликового питателя»

Данный расчет необходим для выявления различий между пробами окатышей, полученных в лабораторных условиях и в производстве.

Таким образом, в лабораторных условиях были наработаны партии окатышей аналогичные рецептуре действующего производства, затем данные окатыши загрузались в пробник; параллельно во второй пробник загрузались окатыши с роликового питателя и одновременно два пробника устанавливались на ОМ. В результате получали среднюю прочность проб лабораторных окатышей «верх», «середина» и «низ» = «f» (кг/ок), средняя прочность окатышей с роликового питателя, как уже известно из выше описанного, = «z».

Принимаем усредненное по многочисленным данным значение $f = 305$ (кг/ок).

Таким образом, «коэффициента лабораторный пробник - пробник окатышей с роликового питателя» будет равен:

$$k_{\text{лаб.пр.}} = z/f, \quad (4.4).$$

Подставляя числовые значения, получим:

$$k_{\text{лаб.пр.}} = 280 / 305 = 0,9180.$$

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, полученные в лаборатории.

«G» - расчетная прочность окатышей на выходе из ОМ, кг/ок:

$$G = f * k_{\text{лаб.пр.}} * k_{п.э.} * k_{\text{пост.}}, \text{ кг/ок} \quad (4.5).$$

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

$$K_{\text{лаб. пробник - ОМ}} = k_{\text{лаб.пр.}} * k_{п.э.} * k_{\text{пост.}} \quad (4.5a).$$

Подставляя числовые значения, получим:

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

Для предоставления данных в математическую модель достаточно использовать формулу (4.6), так как математическая модель окатыши постели учитывает отдельно.

$$H = f * k_{\text{лаб.пр.}} * k_{п.э.}, \text{ кг/ок} \quad (4.6)$$

, где «H» - расчетная прочность окатышей для расчета на математической модели, кг/ок.

В итоге, коэффициент пересчета прочности окатышей «с пробника на обжиговую машину для мат. модели», используемый для математической модели, рассчитывается по формуле:

$$K_{\text{мат. мод.}} = k_{\text{лаб.пр.}} * k_{п.э.} \quad (4.6a).$$

Подставляя числовые значения, получим:

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

В результате был рассчитан коэффициент $K_{\text{мат. мод.}}$ и составил 0,85. То есть, если прочность на сжатие лабораторных окатышей из вертикального пробника 278 кг/ок, то в пересчете для математического моделирования производства данных окатышей на действующей обжиговой машине, составит – 236 кг/ок. Коэффициент $K_{\text{лаб. пробник}}$ - ОМ составил 0,82 – данный коэффициент применяется при прогнозировании качества окатышей без расчета на математической модели. Рассчитанные коэффициенты способствуют максимальному прогнозированию качества обожженных окатышей в перспективе реального их производства на действующей обжиговой машине по результатам полупромышленных испытаний. Так же, коэффициент $K_{\text{мат. мод.}} = 0,85$ позволяет максимально качественно подготовить исходные данные для адаптации математической модели с целью перспективы расчета параметров производства окатышей из новых материалов на действующих обжиговых машинах. Данное является очередным шагом к развитию анализа и прогнозирования производства окатышей из новых шихтовых компонентов, что имеет экономический эффект за счет возможности избежать серий промышленных испытаний с целью выявления необходимого качества обожженных окатышей и параметров производства.

Необходимо пояснить, что рассчитанные коэффициенты являются неадаптивными так как они постоянны (const), ведь соотношение окатышей постели и сырых окатышей, при нормальном производстве, постоянно, отношение окатышей с производства и лабораторных окатышей – постоянно и физическая природа пристеночного эффекта также постоянна. На величину коэффициента 0,85 осуществлялась поправка показателя прочности лабораторных окатышей из вертикальных пробников для дальнейших расчетов на математической модели «НПВП ТОРЭКС».

4.3 Анализ результатов исследования полупромышленных испытаний

Результаты полупромышленных исследований по получению обожженных окатышей ОЖК представлены в таблице 4.1.

В результате анализа таблицы 4.1 выявлено, что у всех 25–и проб удовлетворительные показатели по прочности на удар, истиранию и содержанию FeO. Таким образом, целесообразно провести анализ показателя прочности на сжатие проб обожженных окатышей ОЖК. Ниже представлены графики зависимости показателя прочности на сжатие обожженных окатышей ОЖК от производительности обжиговой машины №2, на которой проводились полупромышленные исследования. Минимальная и максимальная производительность данной обжиговой машины №2 составляет 450 т/ч и 618 т/ч, соответственно.

Таблица 4.1 – Физические свойства и химический состав полупромышленных обожженных окатышей ОЖК

Про-ба №	Концентрат	Основно-сть и требова-ние	Примечание	Производи-тельность ОМ №2 при термообра-ботке, т/ч	Прочно-сть в пробир-ке, кг/ок	Прочность в пробирке с учетом коэффициента 0,85, кг/ок	Миним-альная требуем-ая прочнос-ть, кг/ок	Мини барабан		Порнос-ть, %	Химический состав обожженных окатышей (по анализу/по мат. балансу)														Основность, расчет по анализу	
								Б+5	Б-0,5		Fe _{мин} , %	FeO, %	CaO, %	SiO ₂ , %	MgO, %	Al ₂ O ₃ , %	S, %	C, %	TiO ₂ , %	MnO, %	P ₂ O ₅ , %	Na ₂ O, %	K ₂ O, %	шпш, %	B2, расч.	B3, расч.
1	ОЖК	≈1,29 (по В2), MgO≈1,61%	Доменные окатыши для АО «Уральская сталь»	560	369	314	225	98,3	1,73	24,71	64,7/64,56	<0,5/0,4	2,98/3,2	2,55/2,49	1,34/1,61	0,26/0,19	0,0055/0,00696	0,04	0,014/0,0053	0,018/0,007	0,039/0,01	0,056/0,05	0,22	1,17	≈	
2	ОЖК	≈1,29 (по В2), MgO≈1,61%	Доменные окатыши для АО «Уральская сталь»	618	286	243	225	98,0	2,03	25,16	64,8/64,56	<0,5/0,4	3,01/3,2	2,37/2,49	1,36/1,61	0,25/0,19	0,003/0,00696	0,038	0,012/0,00527	0,026/0,006	0,036/0,01	0,048/0,05	0,16	1,27	≈	
3	ОЖК	≈1,1 (по В2), MgO≈1,08%	Доменные окатыши для АО «Уральская сталь»	575	347	295	225	97,6	2,38	н/д	65,5/65,25	<0,5/0,4	2,88/2,77	2,59/2,51	1,18/1,08	0,24/0,2	0,0032/0,0068	0,034	0,013/0,00476	0,03/0,0057	0,041/0,01	0,04/0,05	0,16	1,1	≈	
4	ОЖК	≈1,1 (по В2), MgO≈0,27%	Доменные окатыши для АО «Уральская сталь»	560	308	262	225	97,8	2,22	25,33	66,0/65,76	<0,5/0,4	3,02/2,82	2,61/2,57	0,16/0,27	0,24/0,22	0,004/0,0065	0,04	0,013/0,00398	0,032/0,006	0,06/0,01	0,038/0,04	0,16	1,2	≈	
5	ОЖК	≈1,1 (по В2), MgO≈0,27%	Доменные окатыши для АО «Уральская сталь»	570	266	226	225	97,7	2,30	26,6	65,9/65,73	0,48/0,1	2,86/2,82	2,39/2,57	0,14/0,27	0,21/0,12	0,0025/0,01	0,09	0,013/0,0039	0,033/0,0055	0,029/0,01	0,028/0,04	0,37	1,2	≈	
6	ОЖК	≈0,392 (по В3), SiO ₂ ≈2,51%	Окатыши на экспорт для Европы	560	396	337	250	97,9	2,12	27,05	67,4/67,31	<0,5/0,4	0,65/0,75	2,37/2,51	0,21/0,24	0,23/0,2	0,0024/0,0066	0,029	0,012/0,0041	0,023/0,0033	0,03/0,01	0,043/0,04	0,21	≈	0,36	
7	ОЖК	≈0,392 (по В3), SiO ₂ ≈2,51%	Окатыши на экспорт для Европы	618	294	250	250	97,3	2,67	24,0	67,2/67,31	<0,5/0,4	0,65/0,75	2,34/2,51	0,21/0,24	0,24/0,2	0,003/0,0066	0,035	0,011/0,0041	0,027/0,0033	0,038/0,01	0,036/0,04	0,14	≈	0,36	
8	ОЖК	≈0,392 (по В3), SiO ₂ ≈2,51%	Окатыши на экспорт для Европы	618	306	260	250	97,6	2,40	25,5	67,3/67,31	0,52/0,4	0,65/0,75	2,35/2,51	0,21/0,25	0,24/0,2	0,0027/0,0066	0,032	0,011/0,0041	0,025/0,0033	0,036/0,01	0,038/0,04	0,175	≈	0,36	
9	ОЖК	≈1,0 (по В3), SiO ₂ ≈2,55%	Высокоосновные на экспорт	455	342	291	280	97,4	2,62	26,5	66,3/66,16	<0,5/0,4	2,43/2,29	2,35/2,55	0,22/0,26	0,24/0,21	0,0046/0,01	0,048	0,012/0,004	0,022/0,0033	0,03/0,01	0,047/0,04	0,22	≈	1,13	
10	ОЖК	≈1,0 (по В3), SiO ₂ ≈2,55%	Высокоосновные на экспорт	520	278	236	250	96,77	3,23	29,2	66/66,16	<0,5/0,4	2,41/2,29	2,67/2,55	0,15/0,26	0,24/0,21	0,0042/0,01	0,11	0,012/0,004	0,03/0,0033	0,032/0,01	0,028/0,04	0,45	≈	0,9	
11	ОЖК	≈1,0 (по В3), SiO ₂ ≈2,55%	Высокоосновные на экспорт	450	363	309	280	97,1	2,9	27,8	66,2/66,16	0,35/0,4	2,42/2,29	2,52/2,55	0,18/0,26	0,24/0,21	0,0043/0,01	0,07	0,013/0,004	0,028/0,0033	0,041/0,01	0,035/0,04	0,3	≈	1,0	
12	ОЖК	≈1,0 (по В3), SiO ₂ ≈2,55%	Высокоосновные на экспорт	500	313	266	250	96,9	3,1	28,5	66/66,16	0,35/0,4	2,41/2,29	2,55/2,55	0,17/0,26	0,24/0,21	0,0044/0,01	0,09	0,013/0,004	0,026/0,0033	0,043/0,01	0,037/0,04	0,4	≈	1,0	
13	ОЖК	≈0,5 (по В3), SiO ₂ ≈2,52%	Окатыши для металлизации	550	354	301	255	97,8	2,20	26,3	67,2/67,11	<0,5/0,4	1,36/1,02	2,42/2,52	0,22/0,24	0,23/0,2	0,0022/0,0066	0,032	0,012/0,0041	0,023/0,0033	0,048/0,01	0,048/0,04	0,21	≈	0,65	

Продолжение Таблицы 4.1

14	ОЖК	0,5 (по В3), SiO ₂ ≈2,52%	Окатыши для металлзации	575	351	299	255	97,3	2,67	27,92	67,3/67,11	<0,5/0,4	1,44/1,02	2,53/2,52	0,14/0,24	0,22/0,2	0,0023/0,0066	0,027	0,012/0,00406	0,028/0,055	0,043/0,01	0,036/0,04	0,14	≈	0,6	
15	ОЖК	≈0,39 (по В3- "DR-grade")	Окатыши для металлзации	500	367	312	280	97,4	2,6	28,0	67,2/67,28	0,52/0,1	0,66/0,74	2,7/2,52	0,21/0,24	0,24/0,1	0,0021/0,01	0,028	0,011/0,00407	0,032/0,034	0,0021/0,01	0,026/0,04	0,22	≈	0,31	
16	ОЖК	≈0,39 (по В3- "DR-grade")	Окатыши для металлзации	570	352	299	280	97,3	2,5	27,5	67,3/67,28	0,515/0,1	0,65/0,74	2,75/2,52	0,21/0,24	0,235/0,1	0,0023/0,01	0,024	0,012/0,00407	0,033/0,036	0,00225/0,01	0,023/0,04	0,23	≈	0,31	
17	ОЖК- дозимель- ченный	≈0,392 (по В3), SiO ₂ ≈2,51%	Окатыши на экспорт для Европы	618	292	249	250	97,5	2,52	27,58	67,4/67,32	0,47/0,6	0,62/0,74	2,56/2,52	0,14/0,24	0,24/0,1	0,0025/0,01	0,033	0,012/0,004072	0,03	≈	0,0025/0,01	0,03/0,04	0,16	≈	0,30
18	ОЖК+Де ррикти Fe-70%	≈0,25 (по В3)	Неофлосованные на экспорт	618	224	190	250	97,47	2,53	26,4	67,5/67,56	0,74/0,6	0,45/0,44	2,9/2,62	0,15/0,22	0,2/0,05	0,0018/0,00449	0,027	/0,00298	≈	0,03	/0,0437	/0,0794	0,20	≈	0,21
19	ОЖК+Де ррикти Fe-70%	≈0,25 (по В3)	Неофлосованные на экспорт	550	298	253	250	97,53	2,47	23,7	67,4/67,56	0,51/0,6	0,51/0,44	2,71/2,62	0,13/0,22	/0,05	/0,00449	≈	0,00298	≈	≈	0,0289	0,07955622	≈	≈	0,24
20	ОЖК+Де ррикти Fe-70%	≈0,25 (по В3)	Неофлосованные на экспорт	550	297	252	250	97,50	2,50	25,06	67,45/67,56	0,71/0,6	0,48/0,44	2,805/2,62	0,14/0,22	/0,05	/0,00449	≈	0,00298	≈	≈	0,03	0,08	0,20	≈	0,22
21	ОЖК+Де ррикти Fe-67% промышл	≈0,15 (по В3)	Неофлосованные на экспорт	618	189	161	250	97,02	2,98	26,8	66,3/66,2	0,74/0,6	0,46/0,44	4,42/4,37	0,16/0,21	0,2/0,06	0,0028/0,00449	0,027	/0,00348	≈	0,034	/0,029	/0,0795	0,15	≈	0,14
22	ОЖК+Де ррикти Fe-67% промышл	≈0,15 (по В3)	Неофлосованные на экспорт	520	282	250	250	97,03	2,97	26,6	66,2/66,26	0,54/0,6	0,5/0,44	4,4/4,37	0,16/0,21	/0,06	/0,00449	≈	/0,00348	≈	≈	0,0437	/0,0794	≈	≈	0,15
23	ОЖК+Де ррикти Fe-67% промышл	≈0,15 (по В3)	Неофлосованные на экспорт	550	267,3	227	250	97,03	2,98	26,68	66,25/66,2	0,64/0,6	0,48/0,44	4,42/4,37	0,16/0,21	0,2/0,06	0,0028/0,00449	0,027	/0,00348	≈	0,034	/0,029	/0,0795	0,15	≈	0,15
24	ОЖК+Де ррикти Fe-70%	≈1,0 (по В3)	Высокоосновные на экспорт	450	264	225	280	97,18	2,80	25,8	65,9/66,1	0,64/0,38	2,54/2,41	2,72/2,67	0,22/0,26	0,19/0,07	0,0015/0,0044	0,1	0,01/0,0029	≈	0,014	/0,0427	/0,077	0,43	≈	1,0
25	ОЖК+Де ррикти Fe-67% промышл	≈1,0 (по В3)	Высокоосновные на экспорт	450	221	188	280	97,35	2,63	27,6	63,3/63,5	0,54/0,37	4,46/4,11	4,18/4,38	0,27/0,27	0,21/0,1	0,0014/0,00437	0,14	0,011	≈	0,018	/0,0277	/0,076	0,53	≈	1,1

На каждом графике (рисунок 4.10 - 4.21) представлены показатели прочности на сжатие обожженных окатышей единого шихтового состава, прошедших термообработку на различных производительностях ОМ №2 (с целью выявления максимальной производительности термообработки окатышей ОЖК того или иного шихтового состава с обеспечением необходимого качества, требуемого потенциальными потребителями); красной линией представлена требуемая потенциальным потребителем прочность на сжатие обожженных окатышей ОЖК.

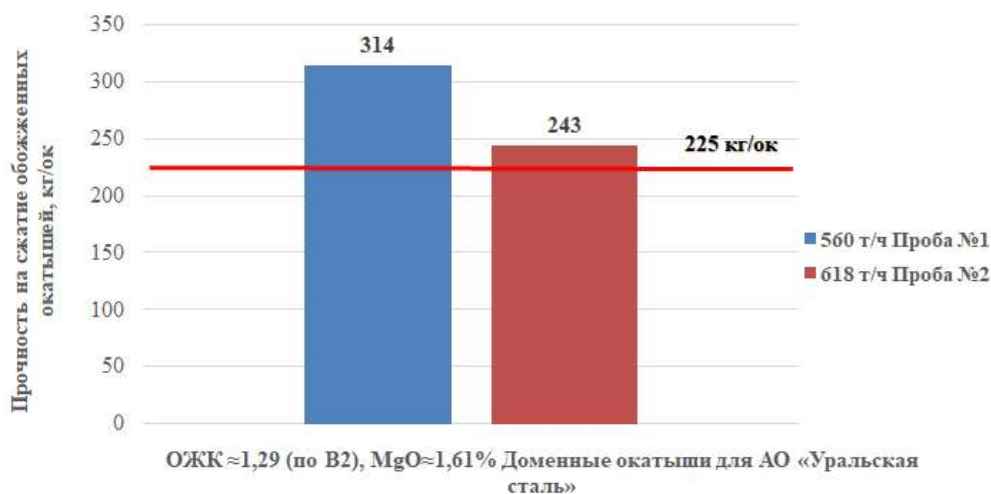


Рисунок 4.10 – Прочность на сжатие обожженных окатышей ОЖК проб №1 и №2 (таблица 4.1)

Как видно из рисунка 4.10, для окатышей данного типа определена максимальная производительность 618 т/ч, при которой прочность на сжатие обожженных окатышей ОЖК составила 243 кг/ок, что выше требуемых 225 кг/ок.

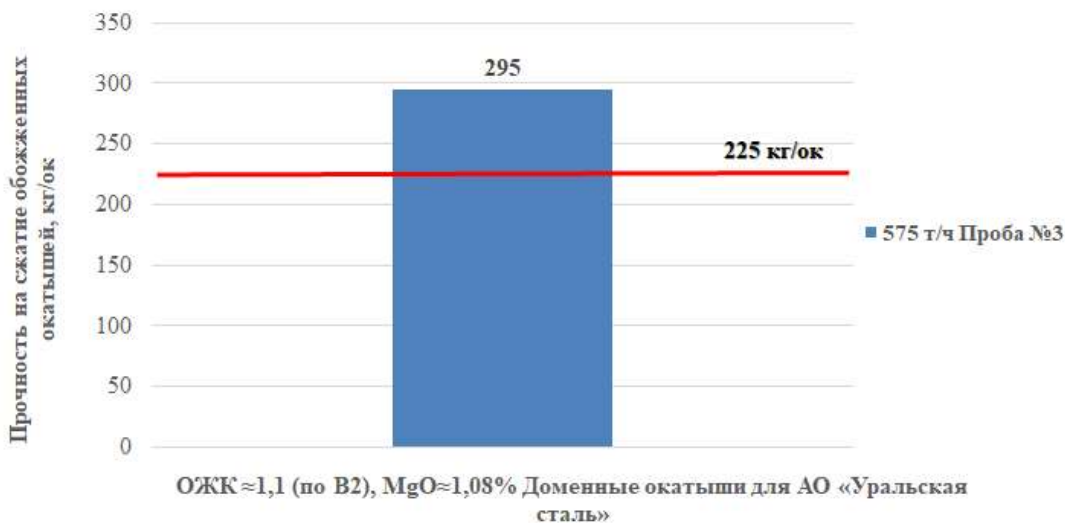


Рисунок 4.11 – Прочность на сжатие обожженных окатышей ОЖК пробы №3 (таблица 4.1)

Как видно из рисунка 4.11, для окатышей данного типа исследована одна

производительность 575 т/ч, при которой прочность на сжатие обожженных окатышей ОЖК составила 295 кг/ок, что выше требуемых 225 кг/ок. Дальнейшие исследования окатышей данного типа на предмет повышенной производительности обжиговой машины не представились возможным в силу потери актуальности в перспективе производства данных окатышей.

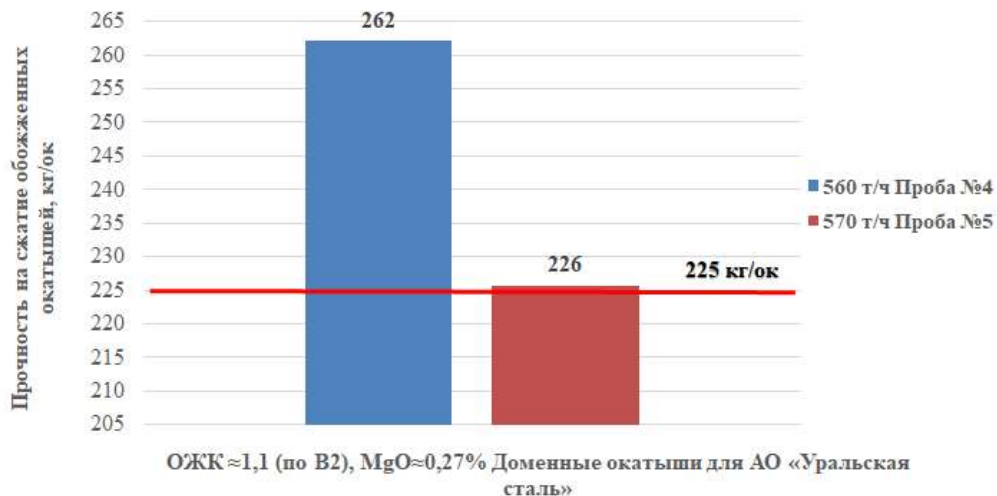


Рисунок 4.12 – Прочность на сжатие обожженных окатышей ОЖК проб №4 и №5 (таблица 4.1)

Как видно из рисунка 4.12, для окатышей данного типа определена максимальная производительность 570 т/ч, при которой прочность на сжатие обожженных окатышей ОЖК составила 226 кг/ок, что соответствует требуемым 225 кг/ок.

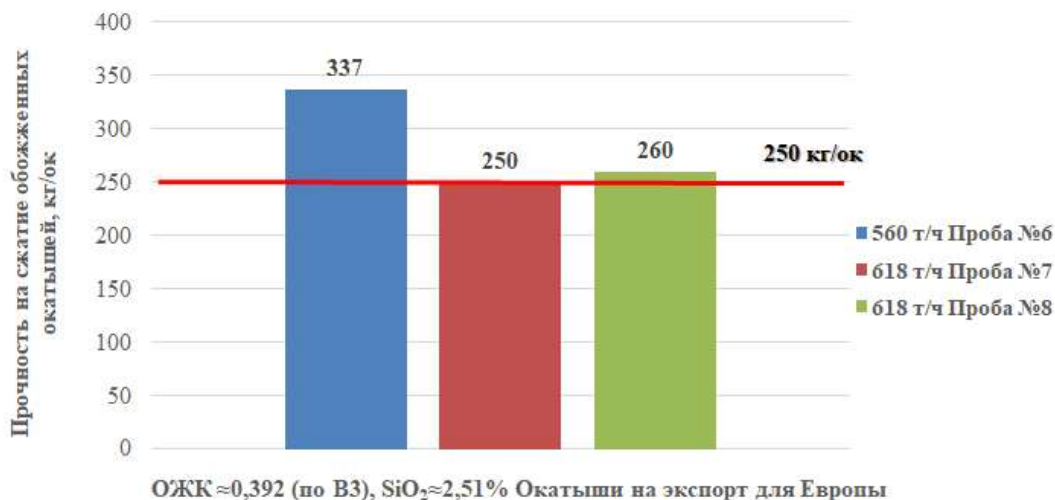


Рисунок 4.13 – Прочность на сжатие обожженных окатышей ОЖК проб №6, №7 и №8 (таблица 4.1)

Как видно из рисунка 4.13, для окатышей данного типа определена максимальная производительность 618 т/ч. На производительности ОМ№2 618 т/ч термообработка

окатышей данного типа осуществлялась 2 раза, с целью ее уточнения. При всем этом, прочность на сжатие обожженных окатышей ОЖК составила 260 кг/ок, что соответствует требуемым 250 кг/ок.

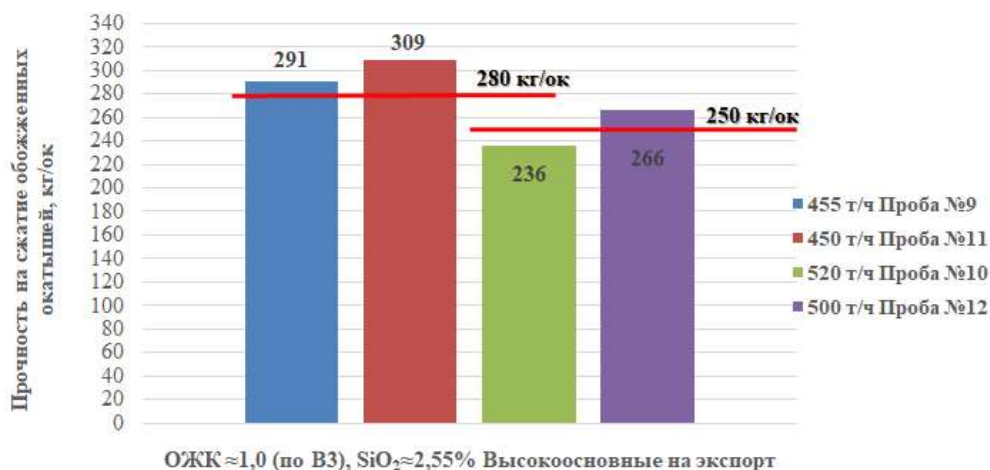


Рисунок 4.14 – Прочность на сжатие обожженных окатышей ОЖК проб №9, №10, №11 и №12 (таблица 4.1)

Как видно из рисунка 4.14, для окатышей данного типа было необходимо выявить две максимально возможные производительности, при которых прочность на сжатие составляла бы не менее 280 кг/ок и 250 кг/ок. Таким образом, при производительности 455 т/ч прочность на сжатие составила 291 кг/ок; при производительности 500 т/ч – 266 кг/ок.

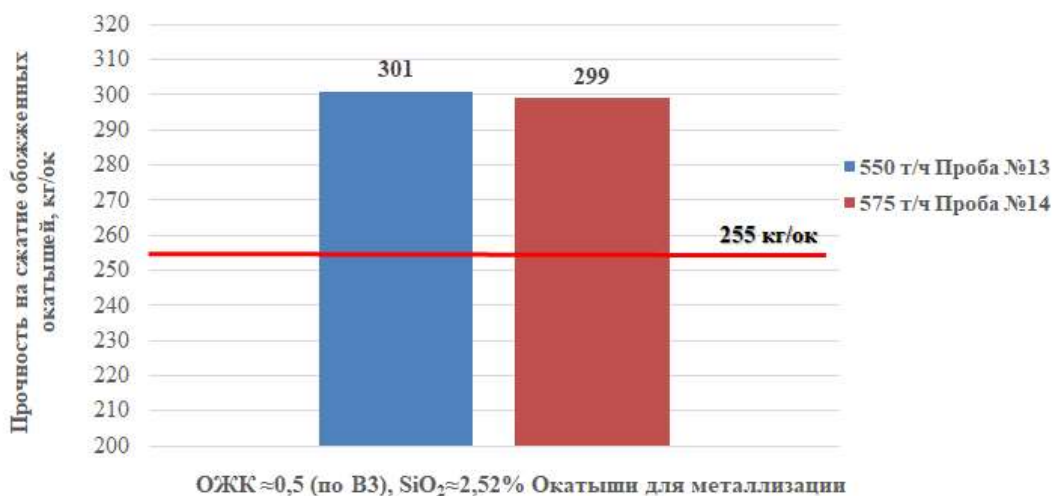


Рисунок 4.15 – Прочность на сжатие обожженных окатышей ОЖК проб №13 и №14 (таблица 4.1)

Как видно из рисунка 4.15, для окатышей данного типа исследовано две производительности: 550 т/ч и 575 т/ч, при производительности 575 т/ч прочность на сжатие обожженных окатышей ОЖК составила 299 кг/ок, что больше требуемых 255 кг/ок. Дальнейшие исследования окатышей данного типа на предмет повышенной

производительности обжиговой машины не представились возможным в силу потери актуальности в перспективе производства данных окатышей.

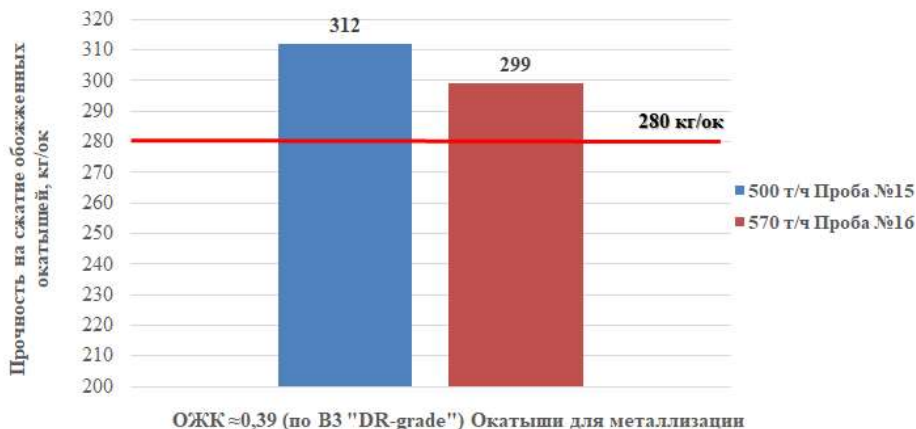


Рисунок 4.16 – Прочность на сжатие обожженных окатышей ОЖК проб №15 и №16 (таблица 4.1)

Как видно из рисунка 4.16, для окатышей данного типа определена максимальная производительность 570 т/ч, при которой прочность на сжатие обожженных окатышей ОЖК составила 299 кг/ок, что соответствует требуемым 280 кг/ок.

Необходимо отметить, что проба №16 по шихтовому составу соответствует пробе №8 таблицы 4.1, при этом отличие данных проб заключается в требовании потенциальных заказчиков к прочности на сжатие обожженных окатышей: для пробы №8 – 250 кг/ок, а для пробы №16 – 280 кг/ок.

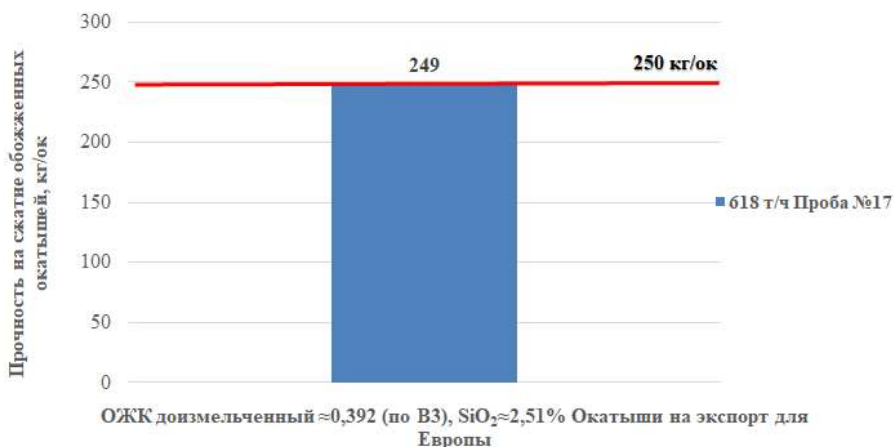


Рисунок 4.17 – Прочность на сжатие обожженных окатышей ОЖК пробы №17 (таблица 4.1)

Как видно из рисунка 4.17, для окатышей данного типа определена максимальная производительность 618 т/ч, при которой прочность на сжатие обожженных окатышей ОЖК составила 249 кг/ок, что условно соответствует требуемым 250 кг/ок. Данный тип окатышей отличается от окатышей рисунка 4.13 только доизмельчением концентрата ОЖК.

Соответственно, анализ показал, что доизмельчение концентрата ОЖК с целью повышения качественных показателей обожженных окатышей не целесообразно в силу отсутствия положительного эффекта. То есть, показатели качества обожженных окатышей с использованием доизмельченного концентрата ОЖК не выше чем у окатышей с использованием исходного концентрата ОЖК, а качество сырых окатышей даже ниже. Данное свидетельствует о том, что показатель удельной поверхности концентрата ОЖК - 2500 см²/г является оптимальным для этого концентрата, и не требует дальнейшего доизмельчения, даже с целью частичного удаления гидрофобной пленки (результат флотационного обогащения) с зерен концентрата ОЖК.

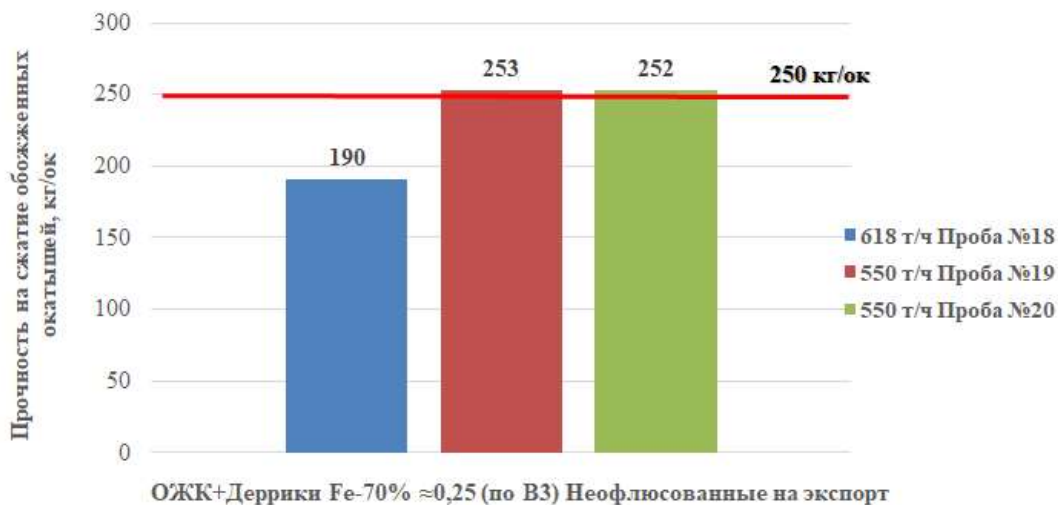


Рисунок 4.18 – Прочность на сжатие обожженных окатышей ОЖК проб №18, №19 и №20 (таблица 4.1)

Как видно из рисунка 4.18, для окатышей данного типа определена максимальная производительность 550 т/ч. На производительности ОМ№2 550 т/ч термообработка окатышей данного типа осуществлялась 2 раза, с целью ее уточнения. При всем этом, прочность на сжатие обожженных окатышей ОЖК составила 253 кг/ок, что соответствует требуемым 250 кг/ок.

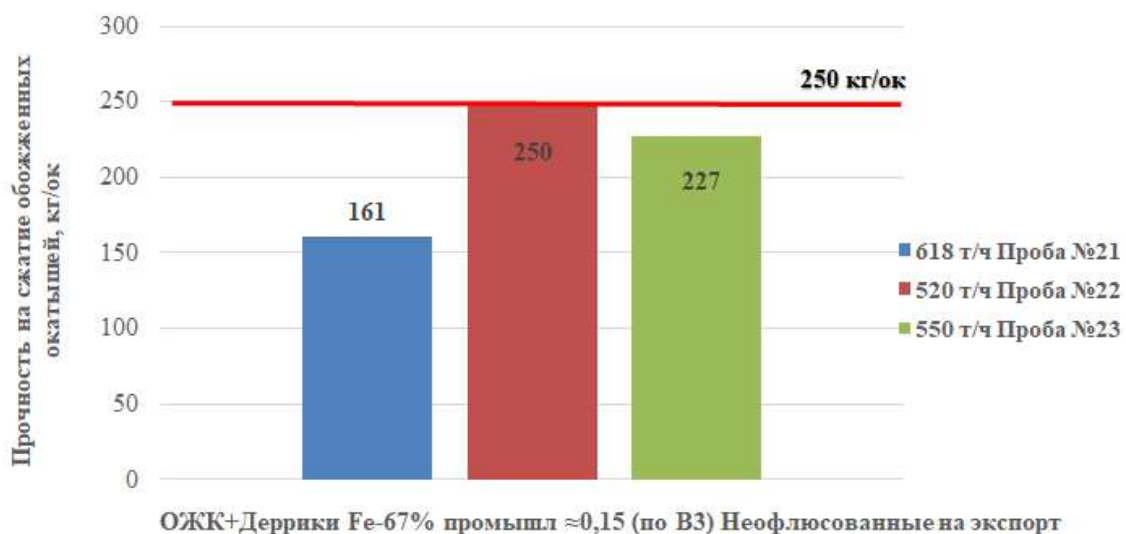


Рисунок 4.19 – Прочность на сжатие обожженных окатышей ОЖК проб №21, №22 и №23 (таблица 4.1)

Как видно из рисунка 4.19, для окатышей данного типа определена максимальная производительность 520 т/ч, при которой прочность на сжатие обожженных окатышей ОЖК составила 250 кг/ок, что соответствует требуемым 250 кг/ок.



Рисунок 4.20 – Прочность на сжатие обожженных окатышей ОЖК пробы №24 (таблица 4.1)

Как видно из рисунка 4.20, прочность на сжатие окатышей данного типа при термообработке на минимальной производительности обжиговой машины 450 т/ч не удовлетворяют требуемому показателю 280 кг/ок, что свидетельствует о нецелесообразности производства окатышей данного типа на обжиговых машинах АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева». Аналогичный вывод имеет место быть при анализе рисунка 4.21.

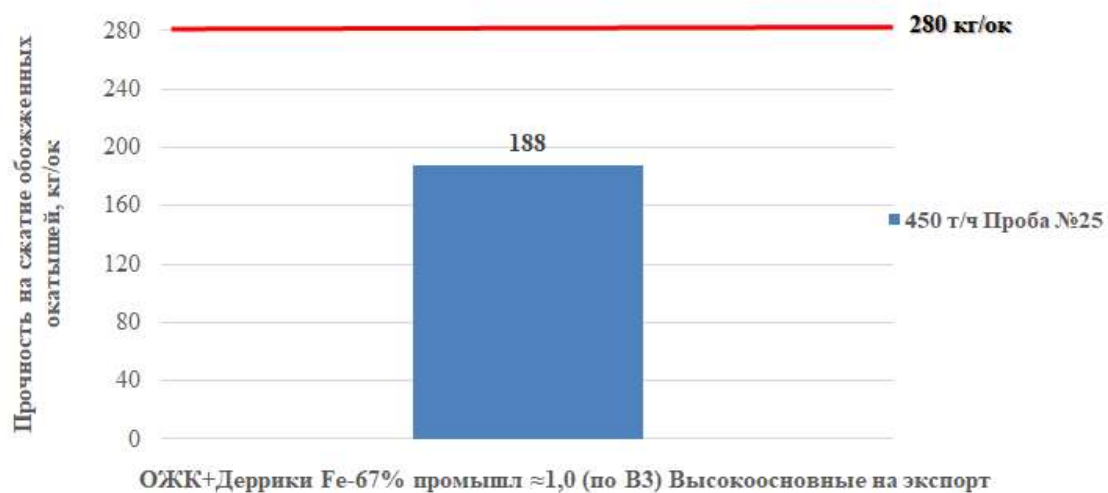


Рисунок 4.21 – Прочность на сжатие обожженных окатышей ОЖК пробы №25 (таблица 4.1)

С учетом анализа проведенных полупромышленных исследований и наличия актуальности перспективы производства конкурентно способного продукта, к дальнейшей адаптации математической модели с целью определения параметров перспективного производства окатышей ОЖК на обжиговых машинах ФОК (фабрики окомкования) АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева», определены типы окатышей, представленные в таблице 4.2, с исходными данными для математической модели ООО «НПВП ТОРЭКС».

Таблица 4.2 – Типы окатышей ОЖК для перспективы внедрения в промышленное производство на АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева» (исходные данные для математической модели ООО «НПВП ТОРЭКС»)

Про-ба-№	Концентрат	Основность и требование	Примечание	Производительность ОМ, % при термообработке, т/ч	Прочность в пробнике, кг/ок	Прочность в пробнике с учетом коэффициента 0,85, кг/ок	Минимальная требуемая прочность, кг/ок	Мини барабан		Пористость, %	Химический состав обожженных окатышей (по анализу/по мат. балансу)														Основность, расчет по анализу	
								Б+5	Б-0,5		Fe _{веш} , %	FeO, %	CaO, %	SiO ₂ , %	MgO, %	Al ₂ O ₃ , %	S, %	C, %	TiO ₂ , %	MnO, %	P ₂ O ₅ , %	Na ₂ O, %	K ₂ O, %	ppp, %	B2-расч.	B3-расч.
1	ОЖК	≈1,1 (по В2); MgO≈0,27%	Доменные окатыши для АО «Уральская сталь»	570	266	226	225	97,7	2,30	26,6	65,9/65,73	0,48/0,1	2,86/2,82	2,39/2,57	0,14/0,27	0,21/0,12	0,0025/0,01	0,09	0,013/0,0039	0,033/	0,055/	0,029/0,01	0,028/0,04	0,37	1,2	≈
2	ОЖК	≈0,392 (по В3); SiO ₂ ≈2,51%	Окатыши на экспорт для Европы	618	306	260	250	97,6	2,40	25,5	67,3/67,31	0,52/0,4	0,65/0,75	2,35/2,51	0,21/0,25	0,24/0,2	0,0027/0,0066	0,032	0,011/0,0041	0,025/	0,053/	0,036/0,01	0,038/0,04	0,175	≈	0,36
3	ОЖК+Дерризи Fe-70%	≈0,25 (по В3)	Неофлосованные на экспорт	550	298	253	250	97,53	2,47	23,7	67,4/67,56	0,51/0,6	0,51/0,44	2,71/2,62	0,13/0,22	/0,05	/0,00449	≈	0,00298	≈	≈	0,0289	0,07955622	≈	≈	0,24
4	ОЖК+Дерризи Fe-67% промшл	≈0,15 (по В3)	Неофлосованные на экспорт	520	282	250	250	97,03	2,97	26,6	66,2/66,26	0,54/0,6	0,5/0,44	4,4/4,37	0,16/0,21	/0,06	/0,00449	≈	/0,003480	≈	≈	0,0437	/0,0794	≈	≈	0,15
5	ОЖК	≈1,0 (по В3); SiO ₂ ≈2,55%	Высокоосновные на экспорт	450	363	309	280	97,1	2,9	27,8	66,2/66,16	0,35/0,4	2,42/2,29	2,52/2,55	0,18/0,26	0,24/0,21	0,0043/0,01	0,07	0,013/0,004	0,028/	0,041/	0,03/0,01	0,035/0,04	0,3	≈	1,0
6	ОЖК	≈1,0 (по В3); SiO ₂ ≈2,55%	Высокоосновные на экспорт	500	313	266	250	96,9	3,1	28,5	66/66,16	0,35/0,4	2,41/2,29	2,55/2,55	0,17/0,26	0,24/0,21	0,0044/0,01	0,09	0,013/0,004	0,0265/	0,043/	0,031/0,01	0,037/0,04	0,4	≈	1,0
7	ОЖК	≈0,39 (по В3-DR-grade)	Окатыши для металлургии	570	352	299	280	97,3	2,5	27,5	67,3/67,28	0,515/0,1	0,65/0,74	2,75/2,52	0,21/0,24	0,235/0,1	0,0023/0,01	0,024	0,012/0,00407	0,033/	0,036/	0,00225/0,01	0,023/0,04	0,23	≈	0,31

4.4 Исследование металлургических свойств обожженных окатышей ОЖК

Металлургические свойства обожженных окатышей характеризуют их качество при дальнейшем переделе: доменной плавке и металлизации. Повышению металлургических свойств обожженных окатышей посвящено достаточно исследований [97-100, 111]. Также, были проведены исследования металлургических свойств доменных брикетов из концентрата окисленных железистых кварцитов Михайловского месторождения [101], но металлургические свойства обожженных окатышей из окисленных железистых кварцитов Михайловского месторождения не исследовались ранее.

Целью работы не являлось определение металлургических свойств обожженных окатышей ОЖК. Но дополнительно, исследование металлургических свойств обожженных окатышей ОЖК осуществлялось у 2 проб таблицы 4.2: проба №2 и №1. Также, для сравнительного анализа исследовали обожженные окатыши из рядового магнетитового концентрата АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева».

У проб окатышей исследовались следующие металлургические свойства:

- Определение индексов прочности после динамического восстановления при низкой температуре ISO 13930.
- Метод определения степени восстановления ГОСТ 17212-84.
- Метод определения температуры начала размягчения и температурного интервала размягчения ГОСТ 26517-85.

Исходные данные для исследований металлургических свойств обожженных окатышей представлены в таблицах 4.3-4.5.

Таблица 4.3 – Исходные данные для исследования металлургических свойств обожженных окатышей Проба №1 (ОЖК основность≈0,392 (по В3), SiO₂≈2,51%, окатыши на экспорт для Европы, проба №2 таблицы 4.2)

Класс крупности, мм	Прочность			Основность В ₂ =CaO/SiO ₂ =0,48	Пористость, % 25,5		
	R, кг/ок.	Б ⁺⁵ , %	Б ^{-0,5} , %				
-14+10 мм	260	97,6	2,4				
Массовая доля компонента, %							
Fe _{общ.}	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	S _{общ.}	ППП
67,3	0,52	2,35	0,24	1,15	0,21	0,0027	0,175

Таблица 4.4 – Исходные данные для исследования металлургических свойств обожженных окатышей Проба №2 (ОЖК основность≈1,1 (по В₂), MgO ≈0,27%, доменные окатыши для АО «Уральская сталь», проба №1 таблицы 4.2)

Класс крупности, мм	Прочность			Основность В ₂ =CaO/SiO ₂ =1,19		Пористость, % 26,6	
	R, кг/ок.	Б ⁺⁵ , %	Б ^{-0,5} , %				
-14+10 мм	226	97,7	2,3				
Массовая доля компонента, %							
Fe _{общ.}	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	S _{общ.}	ППП
65,9	0,48	2,39	0,21	2,86	0,14	0,0025	0,37

Таблица 4.5 – Исходные данные для исследования металлургических свойств обожженных окатышей Проба №3 (рядовые магнетитовые Деррики 67%)

Класс крупности, мм	Прочность			Основность В ₂ =CaO/SiO ₂ =0,51	
	R, кг/ок.	Б ⁺⁵ , %	Б ^{-0,5} , %		
-14+10 мм	266	96,7	2,8		
Массовая доля компонента, %				Пористость, %	
Fe _{общ.}	FeO	SiO ₂	CaO		
63,1	1,15	6,28	3,21	28,06	

Результаты исследований прочности после низкотемпературного восстановления LTD по ISO 13930 приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Исследование прочности после низкотемпературного восстановления LTD по ISO 13930

Проба №	1	2	3
Тип окатыша	ОЖК основность≈0,392 (по В3), SiO ₂ ≈2,51%, окатыши на экспорт для Европы, проба №2 таблицы 4.2	ОЖК основность≈1,1 (по В2), MgO ≈0,27%, доменные окатыши для АО «Уральская сталь», проба №1 таблицы 4.2	Рядовые магнетитовые Деррики 67%
Основность по В2	0,48	1,19	0,51
Класс, мм	-14+10	-14+10	-14+10
Масса перед восстановлением, г	500	500	500
Масса после восстановления, г	498,50	487,60	484
Класс крупности после опыта, мм			
+6,3 (г)	482,00	427,80	463
+3,15 (г)	0,50	17,80	8,1
+0,5 (г)	0,50	13,60	2,4
-0,5 (г)	15,50	28,40	10,5
LTD +6,3 (%)	96,69	87,74	95,66
LTD -3,15 (%)	3,21	8,61	2,67
LTD -0,5 (%)	3,11	5,82	2,17
Состав газа, %	100	100	100
CO	20	20	20
CO ₂	20	20	20
H ₂	2	2	2
N ₂	58	58	58
Расход газа, дм ³ /мин	20	20	20
CO	4	4	4
CO ₂	4	4	4
H ₂	0,4	0,4	0,4
N ₂	11,6	11,6	11,6
Температура нагрева, °С	500	500	500

Результаты исследований восстановимости по ГОСТ 17212 приведены в таблице 4.7

Таблица 4.7 – Исследование восстановимости окатышей по ГОСТ 17212

Проба №	1	2	3
Тип окатыша	ОЖК основность≈0,392 (по В3), SiO ₂ ≈2,51%, окатыши на экспорт для Европы, проба №2 таблицы 4.2	ОЖК основность≈1,1 (по В2), MgO ≈0,27%, доменные окатыши для АО «Уральская сталь», проба №1 таблицы 4.2	Рядовые магнетитовые Деррики 67%
Основность по В2	0,48	1,19	0,51
Класс, мм	-14+10	-14+10	-14+10
Масса перед восстановлением, г / %	500 / 100	500 / 100	500 / 100
Масса после восстановления, г / %	404 / 80,8	401 / 80,2	417 / 83,4
Восстановимость, R, %	60,53	80,41	60,17
Состав газа, %	100	100	100
СО	35	35	35
N ₂	65	65	65
Расход газа, дм ³ /мин	30	30	30
СО (дел.)	10	10	10
N ₂ (дел.)	20	20	20
Температура нагрева, °С			
первые 40 (50) мин	600	600	600
послед. 175 (160) мин	1160	1160	1160

Результаты исследований интервала размягчения по ГОСТ 26517 приведены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Исследование температур и интервала размягчения по ГОСТ 26517

Проба №	1	2	3
Тип окатыша	ОЖК основность≈0,392 (по В3), SiO ₂ ≈2,51%, окатыши на экспорт для Европы, проба №2 таблицы 4.2	ОЖК основность≈1,1 (по В2), MgO ≈0,27%, доменные окатыши для АО «Уральская сталь», проба №1 таблицы 4.2	Рядовые магнетитовые Деррики 67%
Основность по В2	0,48	1,19	0,51
Класс, мм	-14+10	-14+10	-14+10
Температура начала размягчения, °С	1150	1260	1150
Температура конца размягчения, °С	1260	1410	1290
Интервал размягчения, ΔТ, °С	110	150	140

Основные качественные характеристики окискованного железорудного сырья (агломерата, окатышей и брикетов) определяются соответствующими нормативными документами – ГОСТ и ИСО (ISO). Основные металлургические характеристики ЖРС включают в себя:

Прочность в процессе восстановления по ISO 13930:2015 “Руды железные для шихты доменной печи. Динамический метод определения показателей низкотемпературного восстановления”. Определяется содержание классов >6,3 мм и ≤0,5

мм, %. Высокая горячая прочность железорудного сырья обеспечивает его минимальную разрушаемость в шахте доменной печи и сохранение газопроницаемости столба шихтовых материалов по всей высоте сухой зоны. Является одним из важных факторов, обеспечивающим низкий расход кокса и высокую производительность доменной печи;

Восстановимость по ГОСТ 17212-84 «Руды железные, агломераты и окатыши». Определяется степень восстановления материалов газообразными восстановителями в температурном интервале до 1100 °С, %. Повышение восстановимости железорудной части шихты доменных печей, как правило, достоверно приводит к уменьшению удельного расхода кокса в доменном процессе. Обычно усредненные значения для агломератов находятся в диапазоне 55-80 %, для окатышей – 70-95%;

Температурный интервал начала размягчения и плавления ЖРС по ГОСТ 26517–85 (Руды железные, агломераты и окатыши). Определяется температура начала размягчения и температурный интервал размягчения, °С. Температура начала размягчения и температурный интервал размягчения железорудных материалов обеспечивают формирование зоны когезии в доменной печи, ее местоположение и форму. В значительной степени определяет газодинамические условия слоя ЖРС и производительность доменной печи.

Обобщая, можно сформулировать основные требования к металлургическим характеристикам железорудного сырья для доменной плавки, которые приведены в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Требования к металлургическим характеристикам окатышей

№ пп	Показатель	Значение
1	Показатель прочности, +6,3 мм, %, ISO 13930	≥ 80,0
	Показатель истираемости, -0,5 мм, %, ISO 13930	≤ 5,0
2	Восстановимость, %, ГОСТ 17212-84	≥ 90,0
3	Температуры начала размягчения, оС, ГОСТ 26517–85	≥ 960
	Интервал размягчения, град., ГОСТ 26517–85	≤ 200

Анализ проведенных исследований металлургических свойств обожженных окатышей ОЖК показывает, что восстановимость опытных окатышей находится в диапазоне 60-80%, что указывает на резерв по улучшению этого показателя, в том числе для рядовых магнетитовых окатышей (проба №3). Прочность опытных окатышей при низкотемпературном восстановлении соответствует рекомендациям (> 80%) для всех проб. Требования по температурному интервалу соблюдаются для всех проб опытных окатышей.

По совокупным характеристикам проба №2 окатышей практически полностью соответствует предъявляемым требованиям к металлургическим свойствам железорудного сырья для доменного процесса. Таким образом, можно заключить о целесообразности дальнейшего передела данных окатышей. Металлургические свойства целесообразно определять у окатышей ОЖК промышленного производства и, при необходимости, осуществлять их повышение, но это тема другой работы.

4.5 Исследование процессов обжига окатышей из концентрата ОЖК методом математического моделирования и разработка режимных параметров производства обожженных окатышей из концентрата ОЖК на действующих обжиговых машинах АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева»

Краткое описание математической модели ООО «НПВП ТОРЭКС»

Для расчетов тепло-массообмена в слое окатышей ОЖК были произведены расчеты на математической модели процесса окислительного обжига окатышей на конвейерной машине. Разработка модели начиналась сотрудниками ОАО «ВНИИМТ», которые затем продолжили свою деятельность по совершенствованию и развитию модели в ООО «НПВП ТОРЭКС» (далее по тексту математическая модель ООО «НПВП ТОРЭКС»). Данная модель универсальна и учитывает различные тепловые схемы обжиговых машин; виды железорудного сырья и шихтовых добавок (степень окисленности концентрата, различная основность окатышей); виды используемого топлива (газообразное, жидкое) [24]. Модель позволяет решать слоевую задачу, задачи, направленные на оптимизацию конструкции и режимов работы при разработке новых обжиговых машин и при реконструкции действующих. При этом достигается минимизация расхода энергоресурсов при необходимом производстве продукции и заданном ее качестве.

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 [61-64].

В модели слоя учитываются процессы теплообмена между слоем и газом в перекрестном токе, процессы испарения и конденсации влаги, разложение известняка или других карбонатов, горения углерода, окисление кислородом газа магнетита, диссоциация гематита [63, 65], а также формирование расплавов в окатышах и их затвердевание. Теплообмен между слоем и газом описывается в приближении термически тонкого окатыша при расчете коэффициента массивности, с учетом зависимости теплоемкости окатыша от температуры и с учетом тепловых источников и стоков в материале и газе, появляющихся при фазовых превращениях, химических реакциях и переносах массы от газа к материалу (или обратно) в результате явлений испарения воды и химических реакций. Тепловой эффект процесса плавления учитывается с помощью механизма эффективной теплоемкости.

К настоящему времени модель во многом усовершенствована и дополнительно модифицирована. Учтена возможность выделения в газовую фазу свободной влаги при большом потенциале конденсации и ограниченной пористости материала. Добавлена модель упрочнения окатышей, основанная на общих физических представлениях и экспериментальных данных, полученных при длительном нагреве и выдержке окатышей при различных температурах. При этом учитывается влияние скорости последующего охлаждения на формирование конечной холодной прочности окатышей с учетом напряженного состояния их структуры [66]. Топливом в зоне обжига могут служить любые углеводороды или мазут. В модели также рассмотрена задача о десульфурации окатышей на основе обработки имеющихся данных о поведении серы при обжиге окатышей,

содержащих пирит и пирротин.

В соответствии с условиями работы машины при установившемся режиме, когда давление в горне автоматически поддерживается за счет регулирования количества воздуха, подаваемого в первую зону охлаждения, вычислительный алгоритм модели автоматически поддерживает баланс взаимосвязанных потоков теплоносителя через слой в первой зоне охлаждения и в тех зонах, куда поступает нагретый воздух. При этом в неоттапливаемых зонах горна температура теплоносителя над слоем не может превышать температуру переточного воздуха в соответствующей зоне.

Входными данными модели служат: условия работы конвейерной ленты, высота слоя, геометрические, физические и физико-химические характеристики сырых окатышей и окатышей постели, температура слоя на входе, температура и скорость газовой фазы на входе в слой по всей длине машины, характеристики прочности окатышей, некоторые характеристики переточных устройств, характеристика и условия сжигания топлива.

В результате работы модели получаем полное распределение по высоте слоя и длине машины (в частности на выходе) всех характеристик материала окатышей и газового потока, а именно: температуры материала и газа, плотности сухой части шихты, влажности материала и количества свободной влаги в газе, степени разложения известняка, содержания в окатышах магнетита и гематита, степени оплавления материала, скорости газа на выходе из слоя, состава газовой фазы на входе в слой и на выходе, прочности окатышей, расхода и распределения по длине машины топлива, воздуха горения и воздуха разбавления, в частности необходимость, наличие и величину перетоков теплоносителя по длине горна. Тем самым данная модель позволяет анализировать в совокупности теплотехнические (расход топлива и степень прогрева слоя) и технологические (состав и прочность окатышей) параметры работы конвейерной машины, а также, получив характеристики газа на выходе из слоя (в коллекторах), помогает в выборе тягодутьевых средств.

При исследованиях новых видов шихтовых компонентов для производства обожженных окатышей возникает необходимость прогнозирования результатов внедрения данных компонентов в действующее или новое производство. Для компетентного внедрения новых материалов (с обоснованным прогнозированием параметров производства) необходимы расчеты на математической модели. Таким образом, результаты физико-химических, лабораторных и полупромышленных исследований шихтовых компонентов (в том числе концентратов), сырых, сухих и обожженных окатышей являются исходными данными для адаптации математической модели под ту или иную обжиговую машину. Также, входными исходными данными являются физические параметры обжиговой машины: размеры и распределение технологических зон относительно общей площади обжиговой машины; количество и расположение горелочных устройств; количество и назначение тягодутьевых устройств; режимные параметры производства окатышей и так далее. Адаптация математической модели под производство окатышей на обжиговой машине осуществляется путем ввода исходных данных и подбора необходимых коэффициентов (в расчете на модели), с целью получения на модели результатов, полученных при проведении полупромышленных исследований. Далее, когда математическая модель адаптирована, представляется возможность виртуального изменения конструкции обжиговой машины, режимных параметров производства, ввода или исключения того или иного оборудования и все это с получением расчетных

параметров качества готового продукта и некоторых энергозатрат при производстве. То есть, математическая модель ООО «НПВП ТОРЭКС» позволяет достаточно точно прогнозировать: результаты внедрения в производство новых материалов; результаты внедрения вариантов модернизаций и реконструкций; параметры производства новой обжиговой машины. Подробное описание математической модели изложено в труде [63].

От параметров входных исходных данных для адаптации математической модели зависят все последующие результаты ее работы. Следовательно, чем представительней результаты лабораторных и полупромышленных исследований, тем более качественно происходит адаптация модели. Таким образом, перед тем как вводить в математическую модель показатель прочности на сжатие обожженных окатышей из слоевых вертикальных пробников, полученных в результате полупромышленных исследований, необходимо использовать коэффициент пересчета прочности обожженных окатышей из слоевого пробника на прочность окатышей потенциального промышленного производства, рассчитанный автором. Методика расчета, расчет и сам коэффициент представлены выше в главе 4.2. Математическая модель ООО «НПВП ТОРЭКС» разрабатывалась специалистами В.М. Малкиным и А.Б. Боковиковым под научным руководством д.т.н. Б.А. Боковинова, к.т.н. В.И. Клейна, к.т.н. В.М. Абзалова и к.т.н. В.В. Брагина.

Разработчиками модели ООО «НПВП ТОРЭКС» предусмотрен блок горения углерода для вариантов использования твердого топлива, но данный блок до данных исследований не использовался, так как расчеты проводились применительно к магнетитовому концентрату. Таким образом, автором было принято решение о интеграции блока горения углерода в расчет на математической модели, так как концентрат ОЖК гематитовый, при работе с которым необходимо использовать коксик. В математической модели, процесс горения углерода в окатышах характеризуется как расчет доли выгоревшего углерода на расчетном участке по эмпирической формуле, ранее обоснованной разработчиками математической модели и специалистами ООО «НПВП ТОРЭКС», учитывающей физический смысл горения частиц коксика в окатыше и в расчетном слое в целом:

$$K_c = k \cdot C_{O_2} \cdot ((1 - C_c)^n) \cdot \exp(-E_c / (R \cdot T)) \cdot \Delta t, \quad (4.7).$$

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 - абсолютная 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 = 8,314 Дж/ (моль*К);

n – эмпирический показатель степени, характеризующий геометрию окатыша и горение углерода с периферии к центру с уменьшением объема и площади поверхности (принимается 2/3);

Δt – время расчетного шага, с.

Согласно источнику [109], энергия активации горения углерода составляет $E_c = 106000 - 167000$ (Дж/моль), а предэкспоненциальный множитель $k = 4500 - 5500$ (1/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 значений C_c и показателя K_c за предыдущий расчетный шаг по длине обжиговой машины ($C_{C(i+1)} = C_{C(i)} + K_{C(i)}$) и 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-ом метре обжиговой машины и на горизонте слоя 308мм. 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 (4.7), 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/(м³ слоя*с):

$$P_c = (K_c/\Delta\tau) * q_{\text{реак}} * \rho_c, \quad (4.8),$$

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

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

ρ_c – объемное содержание углерода в слое, кг С/м³ слоя ок.

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

Объемное содержание углерода в слое ρ_c вычислим следующим образом:

$$\rho_c = \rho_{\text{нас ок}} * C_{\text{коксик}} * A_K/10000, \quad (4.9),$$

где: $\rho_{\text{нас ок}}$ – насыпная масса окатышей = 2000 (кг/м³);

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

A_K – дозировка коксика в окатыши = 1 %.

Тогда формула (4.8) примет вид:

$$P_c = (K_c/\Delta\tau) * q_{\text{реак}} * \rho_{\text{нас ок}} * C_{\text{коксик}} * A_K/10000, \quad (4.10).$$

Далее, подставляя числовые значения в формулу (4.10), получим:

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

Далее рассчитаем Δq_c – количество тепла выделяемого при выгорании углерода в слое на расчетной площади в расчетное время на единицу ширины обжиговой машины:

$$\Delta q_c = P_c * S_p * \Delta\tau, \quad (4.11),$$

где: P_c - удельная тепловая мощность горения углерода в расчетной точке, МДж/(м³ слоя*с);

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

S_p – расчетная площадь = $0,005*0,05=0,00025$ м².

Подставляя числовые значения в формулу (4.11) 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 которого 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 4.22.

Таким образом, количество теплоты при выгорании углерода участвует в расчете тепло-массообмена в слое окатышей. Очень важно понимать, что необходимо компенсировать теплоту именно внутри окатыша для реализации упрочняющих процессов, таких как твердофазное спекание рудных частиц и жидкофазное спекание нерудных частиц пустой породы и флюсующих добавок. Формулы расчета тепломассообмена в слое окатышей представлены в Приложении Г.

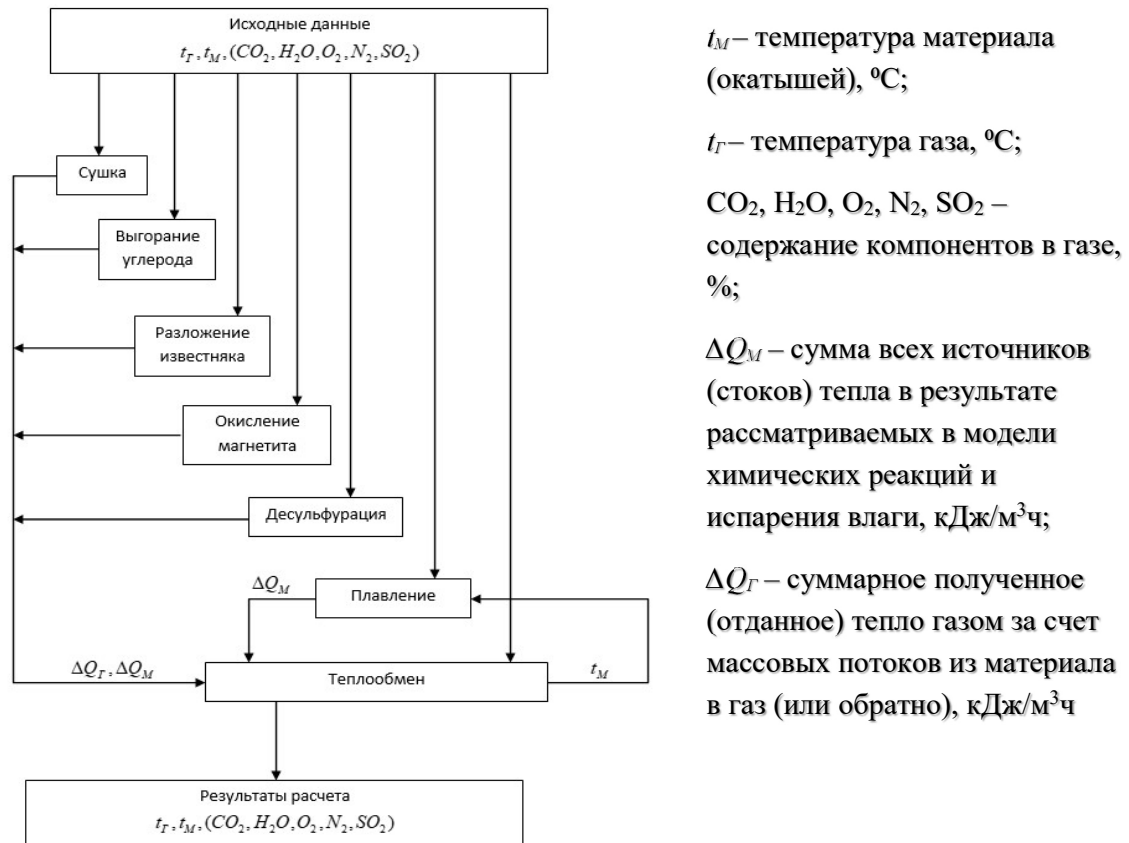


Рисунок 4.22 – Блок-схема алгоритма расчета тепломассообмена в математической модели ООО «НПВП ТОРЭКС»

На рисунке 4.22а представлена схема математической модели, где зеленым цветом выделены вновь введенные данные. Также горение углерода косвенно влияет на многие параметры, например, на расход газообразного топлива, на температуру в рабочем

пространстве обжиговой машины и на температуру слоя на каждом технологическом участке обжиговой машины.

Исходные данные и результаты расчета на математической модели ООО «НПВП ТОРЭКС»

Исходные данные для адаптации и расчетов на математической модели изображены в таблицах 4.2 и 4.10. В таблице 4.10, в том числе, представлены показатели работы обжиговой машины №2 при проведении полупромышленных исследований. Также для математической модели используются параметры материального баланса «окомкования – обжига» (Приложение В) для проб, представленных в таблице 4.10 (в том числе шихтовый состав и дозировки шихтовых компонентов). Исходные данные позволили адаптировать математическую модель ООО «НПВП ТОРЭКС» для дальнейших расчетов с целью разработки режимных параметров работы действующих обжиговых машин АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева» в перспективе внедрения производства окатышей ОЖК.

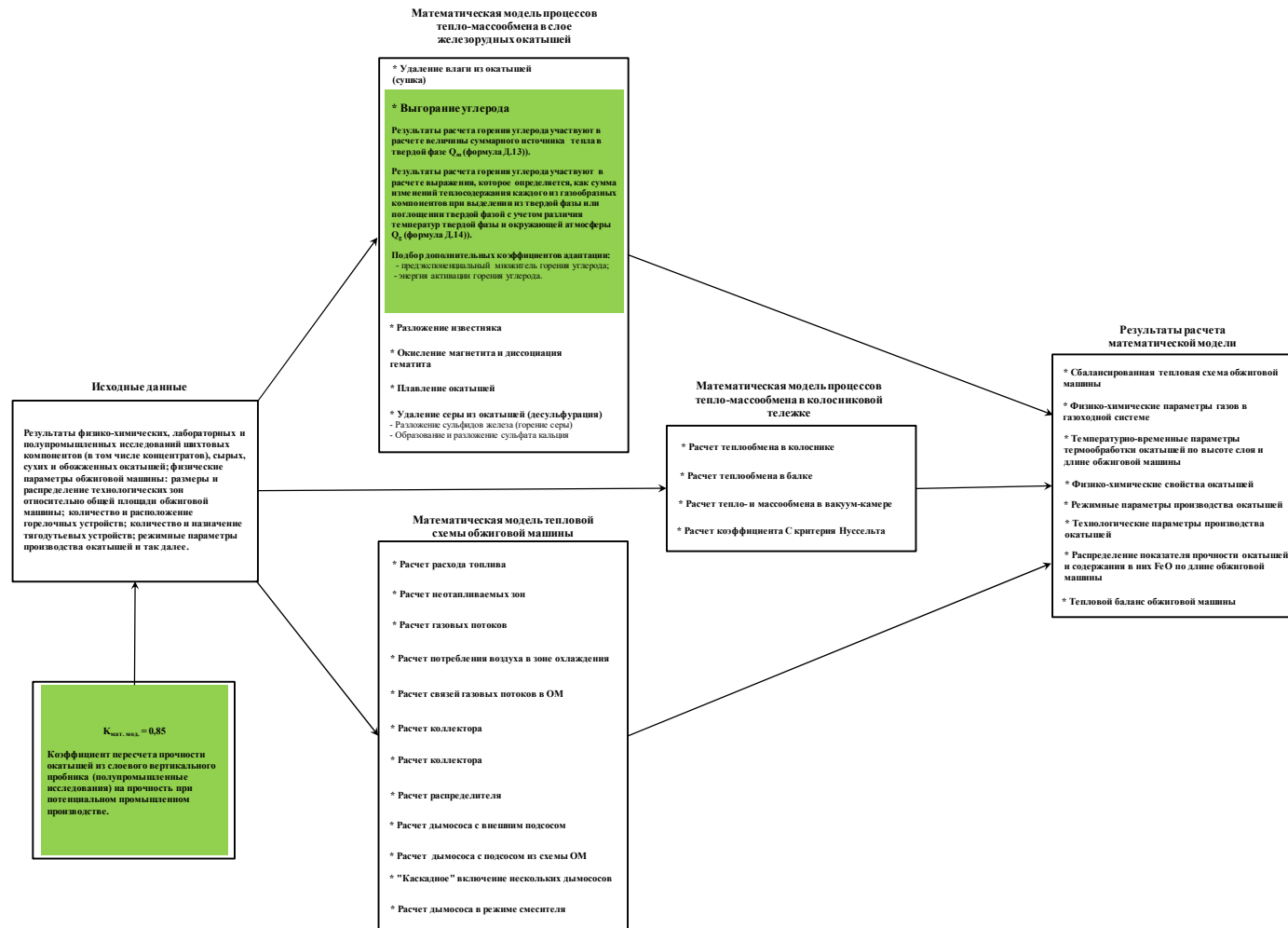


Рисунок 4.22a – Схема математической модели ООО «НПВП ТОРЭКС» (зеленым цветом выделены дополнительные параметры для расчетов окатышей ОЖК)

Таблица 4.10 – Исходные данные для математической модели ООО «НПВП ТОРЭКС»

№ Пробы	Концентрат	Основность и требование	Примечание	Влажность сырых окатышей W, %	Средний диаметр окатышей, мм	Скорость ленты V, м/мин	Высота слоя сырых окатышей, мм	Производительность ОМ, т/ч	Прочность обожженных окатышей, кг/ок	Требуемая прочность обожженных окатышей, кг/ок	Содержание FeO в обожженных окатышах, %	Удельный расход природного газа, м ³ /т	Удельный расход электроэнергии, потребляемый ТДУ, кВт/т
1	ОЖК	≈1,1 (по В2), MgO≈0,27%	Доменные окатыши для АО «Уральская сталь»	9,65	11,0	4,05	352	570	226	225	0,48	11,77	24,14
2	ОЖК	≈0,392 (по В3), SiO ₂ ≈2,51%	Окатыши на экспорт для Европы	9,68	12,6	4,30	334	618	260	250	0,52	10,22	21,64
3	ОЖК+Деррики Fe-70%	≈0,25 (по В3)	Неофлюсованные на экспорт	9,89	11,8	3,80	348	550	253	250	0,51	11,70	23,21
4	ОЖК+Деррики Fe-67% промышл	≈0,15 (по В3)	Неофлюсованные на экспорт	9,58	11,9	3,80	348	520	250	250	0,54	10,96	24,55
5	ОЖК	≈1,0 (по В3), SiO ₂ ≈2,55%	Высокоосновные на экспорт	9,4	13,0	3,15	345	450	309	280	0,35	11,81	28,38
6	ОЖК	≈1,0 (по В3), SiO ₂ ≈2,55%	Высокоосновные на экспорт	9,79	10,2	3,53	345	500	266	250	0,35	11,68	25,61
7	ОЖК	≈0,39 (по В3 "DR-grade")	Окатыши для металлзации	9,89	13,1	4,05	352	570	299	280	0,51	10,4	26,43

После ввода исходных данных в математическую модель, осуществляется подбор коэффициентов, в том числе предэкспоненциальный множитель и энергия активации горения углерода. Помимо данных коэффициентов в модели проводится большое количество расчетов и подборов других параметров. Таким образом осуществляется параметрическая идентификация по результатам лабораторных и полупромышленных исследований окатышей ОЖК. Как только в математической модели реализована параметрическая идентификация, посредством расчета и подбора коэффициентов, то можно считать, что модель адаптирована для дальнейших расчетов и разработки оптимальных режимных параметров производства типа окатышей на той или иной обжиговой машине.

В таблице 4.11 представлены, в том числе, коэффициенты блока горения углерода, позволяющие адаптировать математическую модель для разработки параметров производства окатышей ОЖК. Также для сравнения, в таблице 4.11 отражены коэффициенты адаптации магнетитовых окатышей (проба №0).

Таблица 4.11 - Коэффициенты адаптации математической модели ООО «НПВП ТОРЭКС» для окатышей ОЖК

№ Опыта	Концентрат	Основность и требование	Примечание	Коэффициенты адаптации математической модели ООО "НПВП ТОРЭКС" (ОМ №1, 2/ОМ №3)		
				Предэкспоненциальный множитель горения углерода, 1/с	Энергия активации горения углерода, Дж/моль	Температура начала плавления, °С
1	ОЖК	≈1,1 (по В2), MgO≈0,27%	Доменные окатыши для АО «Уральская сталь»	5278/5278	108082/108082	1171/1171
2	ОЖК	≈0,392 (по В3), SiO ₂ ≈2,51%	Окатыши на экспорт для Европы	4722/4722	106419/110576	1200/1200
3	ОЖК+Деррики Fe-70%	≈0,25 (по В3)	Неофлюсованные на экспорт	5000/5000	116396/116396	1175/1200
4	ОЖК+Деррики Fe-67% промышл	≈0,15 (по В3)	Неофлюсованные на экспорт	5000/5000	116396/116396	1172/1172
5	ОЖК	≈1,0 (по В3), SiO ₂ ≈2,55%	Высокоосновные на экспорт	5000/5000	108913/108913	1200/1200
6	ОЖК	≈1,0 (по В3), SiO ₂ ≈2,55%	Высокоосновные на экспорт	5000/5000	108082/108082	1200/1200
7	ОЖК	≈0,39 (по В3 "DR-grade")	Окатыши для металлизации	5000/5000	116396/116396	1250/1250
0	Derrick 69,3% (магнетитовый концентрат)	≈0,95 MgO≈0,7%	Для АО «Уральская сталь»	-	-	1150

Как видно из таблицы 4.11, для адаптации магнетитовых окатышей, блок углерода

(предэкспоненциальный множитель и энергия активации) не требуется, а температура плавления отличаются от окатышей ОЖК. Температура начала плавления, при которой происходит спекание частиц шихты в поверхностном слое окатыша, у магнетитовых окатышей (проба №0) составляет 1150°C, что ниже чем у окатышей ОЖК. Данный параметр влияет на температурный режим в рабочем пространстве обжиговой машины, обеспечивающий формирование прочностных характеристик окатышей.

Изменение предэкспоненциального множителя и энергии активации в различных опытах, в таблице 4.11 обуславливается параметрической идентификацией температурных режимов термообработки, полученных в результате инструментальных замеров при полупромышленных исследованиях, и температурных режимов термообработки, полученных в результате расчета математической модели.

После того как рассчитаны и подобраны коэффициенты адаптации математической модели, представляется возможность непосредственного расчета параметров производства окатышей ОЖК на обжиговых машинах ФОК АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева». Разработка режимных параметров производства окатышей ОЖК осуществлялась для обжиговых машин ОМ№1, №2 и ОМ№3, при этом необходимо отметить, что обжиговые машины №1 и №2 практически идентичны. Результаты расчетов представлены в таблице 4.12. В данной таблице представлены основные параметры, по которым представляется возможность осуществлять процесс термообработки окатышей ОЖК на обжиговых машинах ФОК АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева». Это далеко не полный перечень параметров, представленных математической моделью.

Математическая модель предоставляет результаты расчета в виде таблиц, графиков и схем обжиговой машины с показателями. В виде примера, на рисунках 4.23 и 4.24 представлены результаты расчета математической модели ООО «НПВП ТОРЭКС» термообработки окатышей ОЖК на ОМ №3 «Доменные окатыши для АО Уральская сталь» (проба №1 таблицы 4.12). В том числе для данного варианта рассчитан тепловой баланс обжиговой машины.

В таблице 4.11а представлены результаты расчета теплового баланса обжиговой машины №3 при термообработке окатышей ОЖК по варианту «Доменные окатыши для АО Уральская сталь» (проба №1 таблицы 4.12)

Описание статей теплового баланса

Приходная часть:

$$Q_{\text{пр}} = Q_{\text{пр.газ}} + Q_{\text{в}} + Q'_{\text{м}} + Q_{\text{коксик}} + Q_{\text{экз}}, \quad (4.12),$$

где: $Q_{\text{пр.газ}}$ – теплота при сжигании природного газа, ГДж/ч;

$Q_{\text{в}}$ – теплота воздуха в газоходную систему и подсосы, ГДж/ч;

$Q'_{\text{м}}$ – теплота окатышей на загрузке в обжиговую машину, ГДж/ч;

$Q_{\text{коксик}}$ – теплота, выделяющаяся при горении коксика, ГДж/ч;

$Q_{\text{экз}}$ – теплота от экзотермических физико-химических процессов (ФХП), ГДж/ч.

Расходная часть:

$$Q_{\text{рас}} = Q''_{\text{м}} + Q_{\text{ух}} + Q_{\text{энд}} + Q_{\text{п}}, \quad (4.13),$$

где: $Q''_{\text{м}}$ – теплота окатышей на разгрузке обжиговой машины, ГДж/ч;

$Q_{уx}$ – теплота газов в дымовую трубу и продувы, ГДж/ч;

$Q_{энд}$ – теплота, затраченная на протекание эндотермических ФХП, ГДж/ч;

$Q_{п}$ – потери теплоты обжиговой машины в окружающую среду, ГДж/ч

Расчет статей приходной и расходной части рассчитывались согласно известным формулам [24], а теплота от горения коксика считалась следующим образом:

$$Q_{\text{коксик}} = q_{\text{реак}} * m_{\text{коксик}} * C_{\text{коксик}} / 1000, \quad (4.14),$$

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

$m_{\text{коксик}}$ – расход коксика в шихту, кг коксика/ч;

$C_{\text{коксик}}$ – содержание углерода в коксике, кг С/кг коксика.

Далее находим значения множителей:

Тепловой эффект реакции горения углерода: $C + O_2 \rightarrow CO_2 + 31,4$ (МДж/кг С), следовательно, $q_{\text{реак}} = 31,4$ (МДж/кг С). Дозировка коксика в шихту 1%, таким образом, если производительность обжиговой машины по сырым окатышам 671 (т/ч), то коксика расходуется 6,71 (т/ч), следовательно, $m_{\text{коксик}} = 6710$ (кг коксика/ч). По результатам химического анализа коксика, в нем содержится 84,25% углерода, следовательно, $C_{\text{коксик}} = 0,8425$ (кг С/кг коксика). Подставляя числовые значения в формулу 4.8, получим:

$$Q_{\text{коксик}} = 31,4 * 6710 * 0,8425 / 1000 = 178 \text{ (ГДж/ч)}.$$

В таблице 4.11а представлены результаты расчета теплового баланса обжиговой машины.

Таблица 4.11а – Тепловой баланс ОМ №3 при термообработке окатышей ОЖК по варианту «Доменные окатыши для АО Уральская сталь» (проба №1 таблицы 4.12)

Тепловой баланс							
Приход теплоты				Расход теплоты			
Статья баланса	Обозначение	ГДж/ч	%	Статья баланса	Обозначение	ГДж/ч	%
Природный газ	$Q_{\text{пр.газ}}$	223	46	Газ в атмосфере	$Q_{уx}$	181	38
Воздух	$Q_{в}$	33	7	Окатыши	$Q''_{м}$	22	5
Окатыши	$Q'_{м}$	8	2	ФХП	$Q_{энд}$	234	49
Коксик	$Q_{\text{коксик}}$	178	37	Потери	$Q_{п}$	41	9
ФХП	$Q_{ЭКЗ}$	37	8	Всего	$Q_{\text{РАС}}$	479	100
Всего	$Q_{\text{ПР}}$	479	100				
Приход теплоты				Расход теплоты			
Статья баланса	Обозначение	МДж/т	%	Статья баланса	Обозначение	МДж/т	%
Природный газ	$Q_{\text{пр.газ}}$	377	46	Газ в атмосфере	$Q_{уx}$	307	38
Воздух	$Q_{в}$	57	7	Окатыши	$Q''_{м}$	38	5
Окатыши	$Q'_{м}$	14	2	ФХП	$Q_{энд}$	397	49
Коксик	$Q_{\text{коксик}}$	301	37	Потери	$Q_{п}$	70	9
ФХП	$Q_{ЭКЗ}$	63	8	Всего	$Q_{\text{РАС}}$	812	100
Всего	$Q_{\text{ПР}}$	812	100				

Как видно из таблицы 4.11а, введенный в шихту коксик внес 37% теплоты в обжиговую машину, что в сумме с теплотой от экзотермических реакций (окисление магнетита) составляет 45% и сопоставима с теплотой от экзотермических реакций при термообработке магнетитовых окатышей $\approx 35-55\%$.

Также рассчитаем коэффициент полезного действия обжиговой машины, % по формуле:

$$\eta = ((Q''_m - Q'_m + Q_{\text{энд}}) * 100) / (Q_{\text{пр.газ}} + Q_{\text{коксик}} + Q_{\text{экз}}), \quad (4.15).$$

Подставляя числовые значения получим:

$$\eta = ((22 - 8 + 234) * 100) / (223 + 178 + 37) = 56,6 \%$$

Полученное значение коэффициента полезного действия (КПД) обжиговой машины сопоставимо и даже незначительно превосходит КПД обжиговых машин, работающих на магнетитовых концентратах, значение которых $\approx 42-55\%$.

Необходимо отметить, что полный перечень результатов расчета математической модели ООО «НПВП ГОРЭКС» по всем 7-ми вариантам таблицы 4.10 является доступным для АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева» для перспективы внедрения в производство концентрата ОЖК. Отображение всех результатов расчета в данной работе – излишне, так как результаты несут сугубо прикладной, внедренческий характер.

На этапе перспективы внедрения в производство окатышей ОЖК не потребовалась реконструкция и модернизация обжиговых машин АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева» в силу возможности производства окатышей ОЖК на действующих тепловых схемах ОМ. Таким образом, представляется возможность экономии финансовых средств.

Таблица 4.12 – Рассчитанные на математической модели ООО «НПВП ТОРЭКС» параметры производства окатышей ОЖК на обжиговых машинах ФОК АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева»

№ опыта	Концентрат	Основность	Примечание	№ ОМ	Высота слоя сырых окатышей Нсл, мм	Высота слоя окатышей постели Нп, мм	Средний диаметр окатышей док, мм	Влажность сырых окатышей W сыр. ок., %	Скорость ОМ Ул, м/мин	Производительность ОМ по обожженным окатышам Соб, т/час	Требование по прочности обожженных окатышей, кг/ок	Прочность обожженных окатышей, кг/ок	Удельный расход природного газа Vт, м³/т	Содержание FeO в обожженных окатышах, %	Температура в зоне обжига (max), °C	Температура на границе слой-постель (max), °C
1	ОЖК	≈1,1 (по В2), MgO≈0,27%	Доменные окатыши для АО «Уральская сталь»	ОМ-№1, 2 (520 м²)	330	70	11,0	9,65	4,39	583	225	227	10,7	0,31	1260	1191
				ОМ-№3 (592 м²)	335	75	11,0	9,65	4,38	590		265	11,0	0,35	1290	1205
2	ОЖК	≈0,392 (по В3), SiO2≈2,51%	Окатыши на экспорт для Европы	ОМ-№1, 2 (520 м²)	330	70	12,6	9,68	4,61	629	250	251	11,1	0,57	1260	1198
				ОМ-№3 (592 м²)	335	85	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	ОМ-№1, 2 (520 м²)	330	70	11,8	9,89	3,91	565	250	262	9,7	0,65	1250	1196
				ОМ-№3 (592 м²)	335	85	11,8	9,89	4,53	665		263	9,1	0,91	1270	1105
4	ОЖК+Деррики Fe-67% промышл.	≈0,15 (по В3)	Неофлюсованные на экспорт	ОМ-№1, 2 (520 м²)	330	70	11,9	9,58	3,87	554	250	250	10,3	0,68	1250	1198
				ОМ-№3 (592 м²)	335	85	11,9	9,58	4,31	627		256	9,0	0,66	1270	1196
5	ОЖК	≈1,0 (по В3), SiO2≈2,55%	Высокоосновные на экспорт	ОМ-№1, 2 (520 м²)	330	70	13,0	9,4	3,4	457	280	290	14,3	0,53	1260	1217
				ОМ-№3 (592 м²)	335	85	13,0	9,4	3,4	464		292	15,4	0,39	1270	1210
6	ОЖК	≈1,0 (по В3), SiO2≈2,55%	Высокоосновные на экспорт	ОМ-№1, 2 (520 м²)	330	70	10,2	9,79	3,8	509	250	267	13,5	0,59	1260	1215
				ОМ-№3 (592 м²)	335	85	10,2	9,79	3,8	517		251	12,4	0,47	1270	1173
7	ОЖК	≈0,39 (по В3 "DR-grade")	Окатыши для металлзации	ОМ-№1, 2 (520 м²)	330	70	13,1	9,89	4,38	603	280	284	11,8	0,69	1260	1239
				ОМ-№3 (592 м²)	335	85	13,1	9,89	4,38	612		282	9,2	0,56	1290	1243

Таблица 4.13 – Шихтовый состав окатышей ОЖК

Проба №	Концентрат	Основность и требования	Примечание	Содержание компонентов в шихте на сухую							
				Концентрат ОЖК, %	Концентрат Деррик 70%, %	Концентрат Деррик 67% (пром.), %	Бентонит, %	Известняк, %	Доломит, %	Коксик, %	Полимерное связующее Alcotac CS, г/10 кг шихты
1а	ОЖК	≈1,1 (по В2), MgO≈0,27%	Доменные окатыши для АО «Уральская сталь»	91,30	_	_	0,6	_	7,1	1,0	1,5
2а	ОЖК	≈0,392 (по В3), SiO ₂ ≈2,51%	Окатыши на экспорт для Европы	98,40	_	_	0,6	_	_	1,0	1,5
3а	ОЖК+Деррик Fe-70%	≈0,25 (по В3)	Неофлюсованные на экспорт	49,45	49,45	_	0,6	_	_	0,5	1,5
4а	ОЖК+Деррик Fe-67% промшл	≈0,15 (по В3)	Неофлюсованные на экспорт	49,45	_	49,45	0,6	_	_	0,5	1,5
5а	ОЖК	≈1,0 (по В3), SiO ₂ ≈2,55%	Высокоосновные на экспорт	95,57	_	_	0,6	2,83	_	1,0	1,5
6а	ОЖК	≈1,0 (по В3), SiO ₂ ≈2,55%	Высокоосновные на экспорт	95,57	_	_	0,6	2,83	_	1,0	1,5
7а	ОЖК	≈0,39 (по В3 "DR-grade")	Окатыши для металлизации	98,40	_	_	0,6	_	_	1,0	1,5

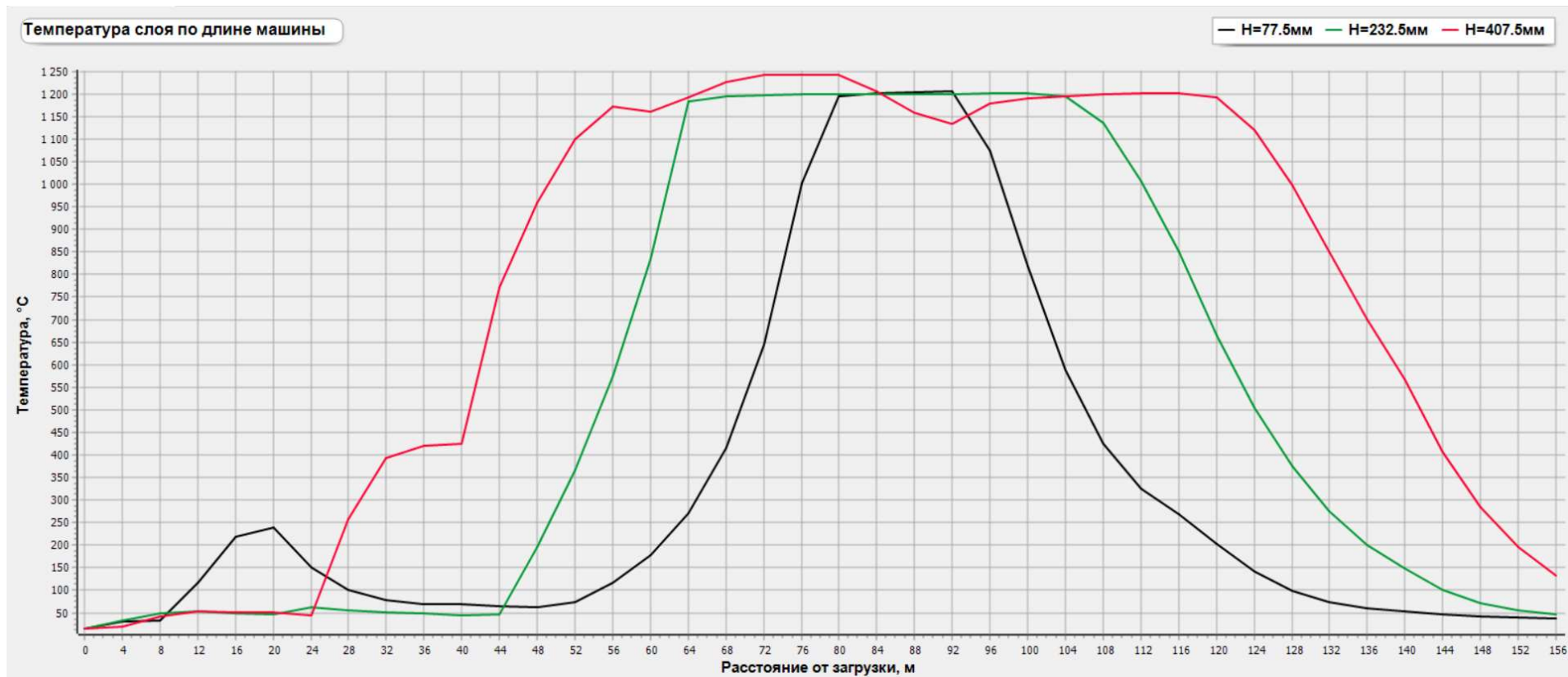


Рисунок 4.23 – Температура слоя окатышей, рассчитанная на математической модели ООО «НПВП ТОРЭКС» (для окатышей ОЖК «Доменные окатыши для АО Уральская сталь» (проба №1 таблицы 4.12) на ОМ №3)

■ Температура, °C
■ Скорость фильтрации, $\text{м}^3/(\text{м}^2\text{с})$
■ Расход, тыс. $\text{м}^3/\text{час}$

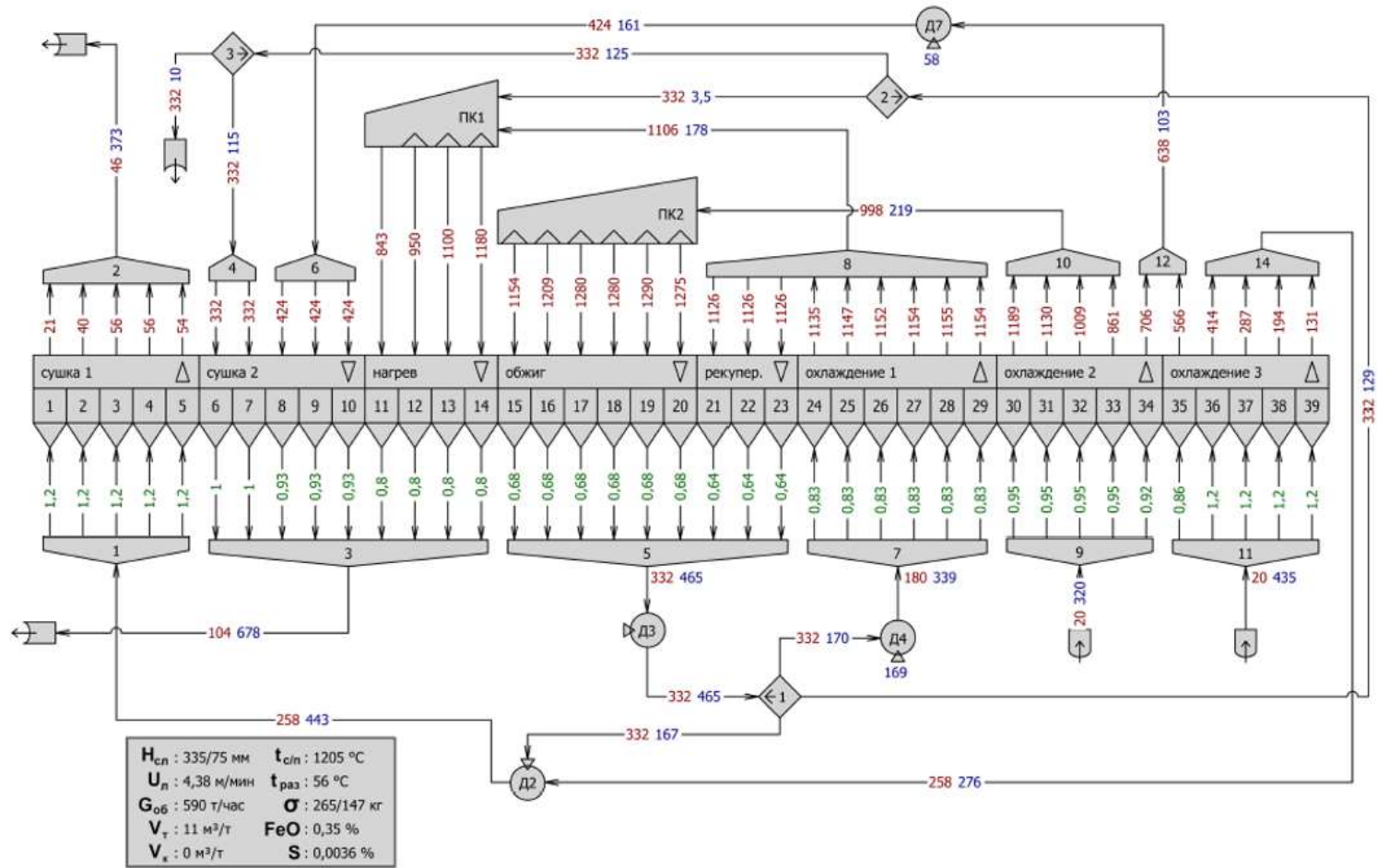


Рисунок 4.24 – Схема ОМ №3 с параметрами, рассчитанными на математической модели при производстве окатышей ОЖК «Доменные окатыши для АО Уральская сталь» (проба №1 таблицы 4.12)

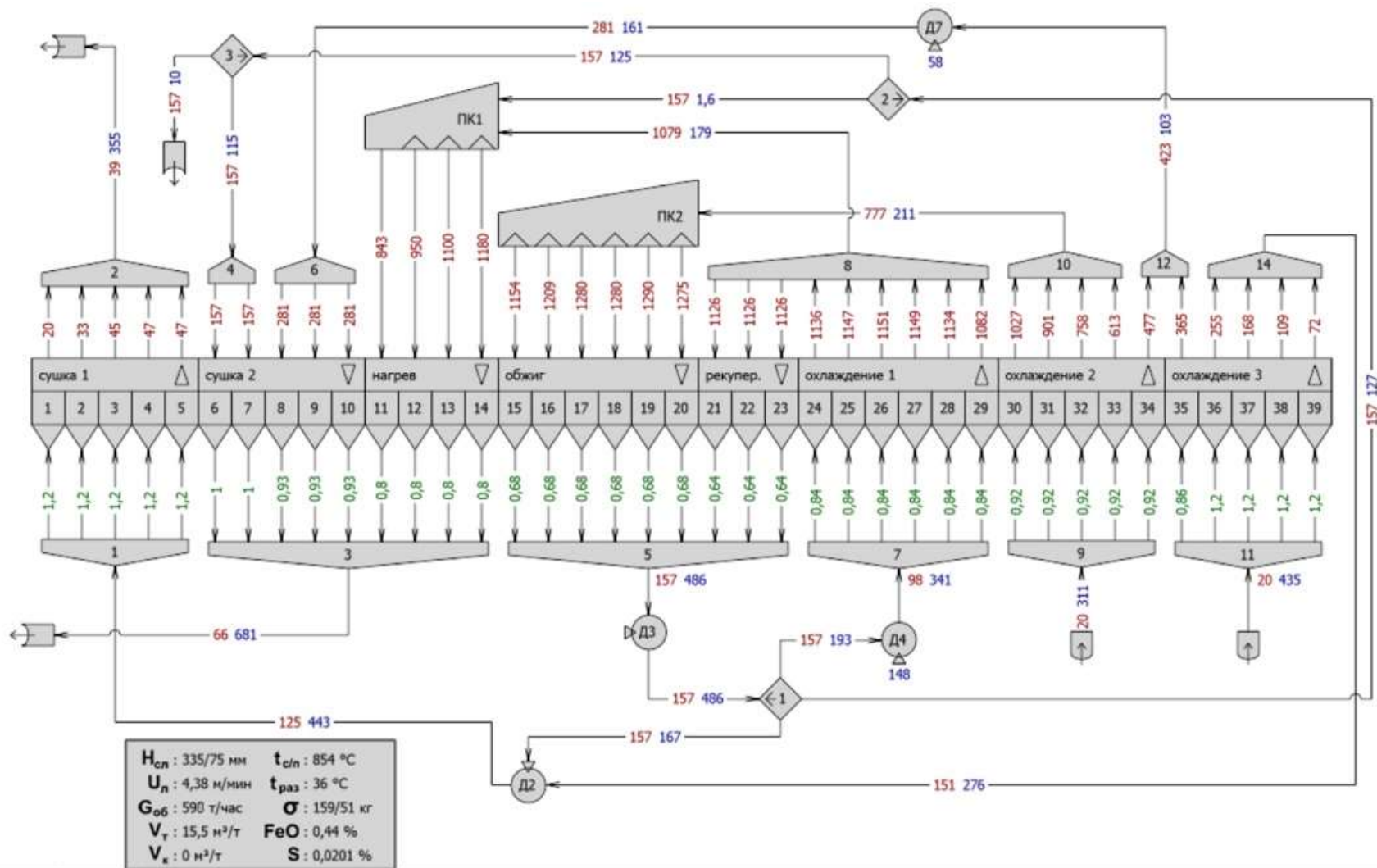


Рисунок 4.24а – Схема ОМ №3 с параметрами, рассчитанными на математической модели без добавления коксика, при производстве окатышей ОЖК «Доменные окатыши для АО Уральская сталь» (проба №1 таблицы 4.12)

На рисунке 4.23 представлены температуры слоя окатышей вдоль обжиговой машины. Данные графики являются необходимым ориентиром для обеспечения режима термообработки с целью получения необходимого качества окатышей ОЖК, при внедрении их в производство. На рисунке 4.24 представлена схема обжиговой машины с параметрами, в том числе температуры и расходы теплоносителей, что позволяет, в том числе, оценить работу тяго-дутьевых машин и горелочных устройств. Важным на схеме является расчетная температура в рабочем пространстве обжиговой машины, что позволяет задавать необходимую уставку на горелочные устройства обжиговой машины. Это лишь малая доля демонстрации пользы расчетов параметров производства посредством математической модели. При внедрении промышленного производства необходимо ориентироваться на результаты расчетов: соблюдать расчетный температурный режим термообработки, такие параметры как влажность сырых окатышей, высота слоя сырых окатышей и окатышей постели, средний диаметр окатышей, скорость обжиговой машины и так далее, и тогда будут достигнуты прогнозируемые в математической модели показатели качества обожженных окатышей.

Для подтверждения необходимости использования твердого топлива (кокшика) при термообработке гематитового концентрата и интеграции блока горения углерода в модель, на математической модели ООО «НПВП ТОРЭКС» были рассчитаны параметры производства окатышей ОЖК на обжиговой машине №3 по шихтовому составу пробы №1 таблицы 4.12. без учета блока горения углерода. Результаты данного расчета представлены на рисунке 4.24а – это расчеты аналогичные тем, результаты которых представлены на рисунке 4.24. Таким образом, на рисунках 4.24 и 4.24а представлены результаты расчетов с добавлением кокшика и без него, соответственно. Как видно на рисунке 4.24а, прочность обожженных окатышей без добавления кокшика составила 159 кг/ок (не допустимо), что на 106 кг/ок ниже прочности окатышей с добавлением кокшика, а также удельный расход природного газа составил 15,5 м³/т, что на 4,5 м³/т выше расхода при добавлении кокшика. Самое важно, что при всем данном, даже при увеличении расхода природного газа, без добавления кокшика внутрь окатыша не достигается необходимая прочность окатышей. Выше изложенные обоснованные выводы подтверждают, что компенсация теплоты экзотермических реакций от окисления магнетита, при термообработке гематитовых окатышей ОЖК, необходима внутри окатыша, то есть данную компенсацию недостаточно осуществить увеличением количества продуктов горения природного газа.

Результаты разработки параметров производства окатышей ОЖК Михайловского месторождения на обжиговых машинах ФОК (фабрики окомкования) АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева» способствуют компетентному внедрению производства окатышей ОЖК.

4.6 Технические и технологические решения производства окатышей на обжиговых машинах АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева» из концентрата окисленных железистых кварцитов Михайловского месторождения

Технологические решения

В результате выполнения данной диссертационной работы были сформированы технологические решения, способствующие компетентному вовлечению в производства 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. Данное изложено ниже.

1. Необходимо в шихту добавлять полимерное связующее в количестве 0,015 % от массы шихты.

2. Дозировка бентонита в шихту – 0,6 %.

3. Необходимо в шихту добавлять 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 м³/т.

12. Содержание FeO в обожженных окатышах – 0,31–0,91 %.

Для каждой из 7 различных видов окатышей ОЖК разработаны 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. Примером таких параметров производства для окатышей ОЖК «Доменные окатыши для АО Уральская сталь» является таблицы 4.12 и 4.13, рисунки 4.23 (температурный режим обжига) и 4.24 (тепловая схема обжиговой машины).

При внедрении в производство окатышей ОЖК не потребуется реконструкция и модернизация обжиговых машин АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева» в силу возможности производства окатышей ОЖК на действующих тепловых схемах ОМ. Таким образом, представляется возможность экономии финансовых средств.

Технические решения

В результате выполнения данной диссертационной работы были сформированы технические решения, способствующие компетентному вовлечению в производства окатышей ОЖК из концентрата окисленных железистых кварцитов Михайловского месторождения.

При внедрении в промышленное производство окатышей ОЖК, необходимо будет строительство на ФОК АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева» участков по приему твёрдого 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 ≈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 потребуется 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 0-5мм железнодорожным транспортом.

Рекомендуется строительство следующих новых участков по приемке, складированию и переработке коксика:

- тепляк;
- склад коксика;
- участок помола коксика.

Тепляк

Тепляк предназначен для обогрева одновременно одного вагона с коксиком в зимний период перед разгрузкой на склад.

Склад коксика

Склад коксика предназначен для приема и хранения запаса коксика перед помолом. Для переработки 6,6 млн. т. в год концентратов ОЖК потребуется склад емкостью 11000 т (запас на 1 месяц). Склад предполагается закрытого типа. Для разгрузки вагонов с коксиком предусматривается вагоноопрокидыватель. Распределение коксика по складу осуществляется грейферным краном и фронтальным погрузчиком.

Участок помола коксика

Участок помола предназначен для измельчения коксика фракции 0-5мм до фракции $-0,071$ мм. с производительностью 15 т./ч. Со склада грейферным краном коксик загружается в накопительный бункер. Разгрузка бункера осуществляется на ленточный конвейер, на котором установлены магнитный металлосепаратор и металлодетектор для удаления из потока коксика возможных посторонних металлических предметов. Далее коксик поднимается элеватором в бункер, предназначенный для загрузки мельницы. Из бункера коксик транспортируется в мельницу дозатором. Измельчение коксика осуществляется в вертикальной валковой мельнице. Измельченный коксик поднимается горячим газом, подаваемым в мельницу от газогенератора. Готовый коксик улавливается из пылегазового потока в рукавном фильтре и транспортируется с помощью винтовых конвейеров и элеватора в накопительный силос, расположенный на этом же участке. Транспортировка готового коксика с участка помола осуществляется пневмотранспортом (пневмокамерными насосами) в силос, устанавливаемый рядом с корпусом окомкования. Подшихтовку коксика из силоса в количестве ≈ 8 т/ч. предполагается подавать винтовым питателем на конвейер концентрата после дозировки полимерного связующего.

На рисунке 4.25 и таблице 4.14 представлены примерная схема ввода коксика в производство окатышей ОЖК и подписи к данной схеме, соответственно.

Подробная проработка ввода полимерного связующего и коксика в производство окатышей ОЖК будет производиться в период разработки ТЭО 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 2023г.). При маржинальности окатышей на уровне 1,5...2,0 тыс. р./т срок окупаемости инвестиций составит от 7 до 10 лет.

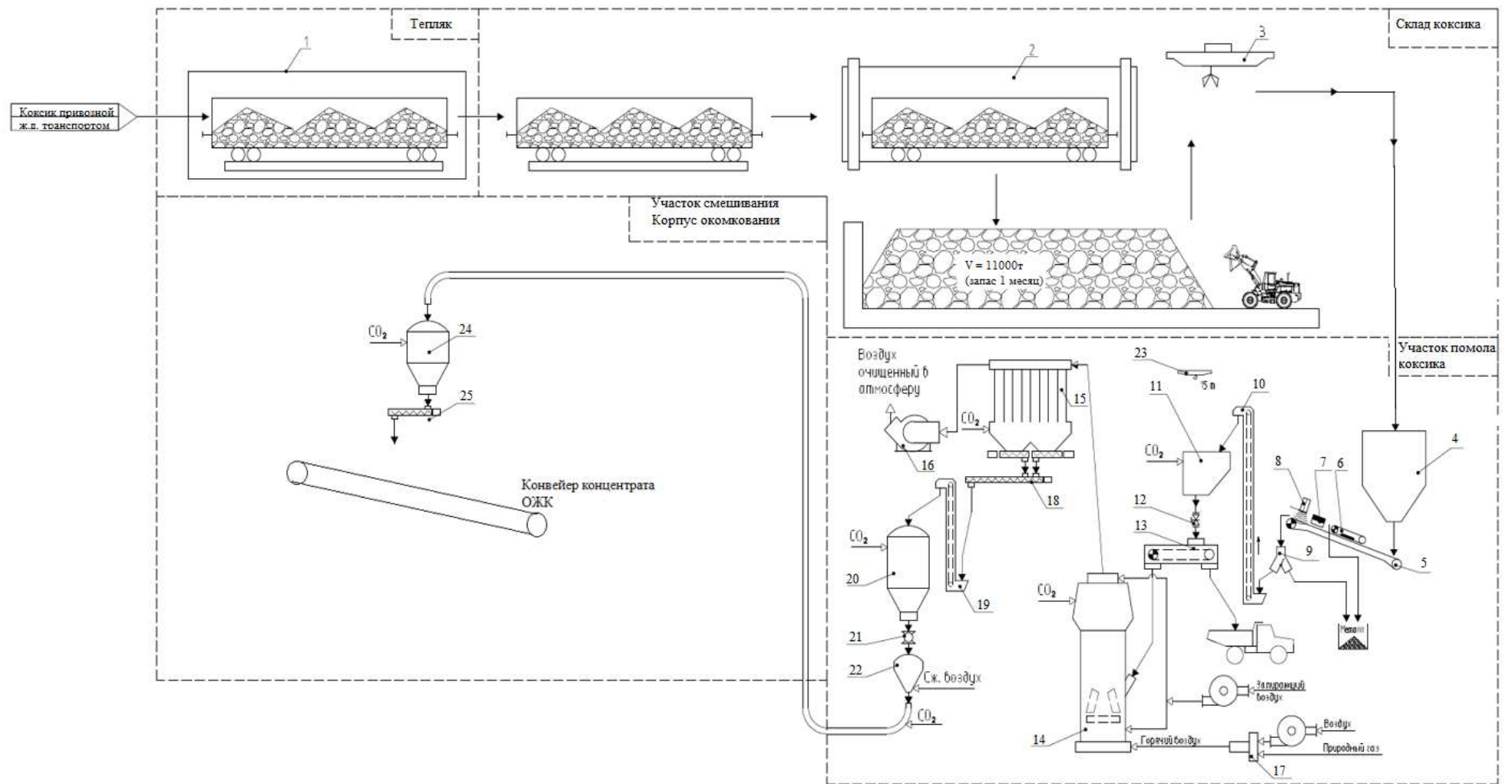


Рисунок 4.25 – Схема ввода в шихту коксика для производства окатышей ОЖК

Таблица 4.14 – Основное оборудование ввода коксика в шихту для производства окатышей ОЖК

Поз.	Наименование	Кол.	Примечание
	Тепляк		
1	Оборудование для размораживания вагона с коксиком	1	
	Склад коксика		
2	Вагонопрокидыватель	1	
3	Кран мостовой электрический грейферный	1	
	Участок помола коксика		
4	Бункер, общий объем 250 м ³	1	
5	Конвейер ленточный наклонный, ширина ленты 650мм	1	
6	Магнитный металосепаратор	1	
7	Металлодетектор	1	
8	Датчик тления	1	
9	Переключатель потоков	1	
10	Элеватор ковшовый цепной	1	
11	Бункер, общий объем 15м ³	1	
12	Затвор шиберный	1	
13	Дозатор	1	
14	Мельница валковая вертикальная	1	
15	Рукавный фильтр	1	
16	ТДУ	1	
17	Газогенератор	1	
18	Конвейер винтовой	1	
19	Элеватор ковшовый цепной	1	
20	Силос, общий объем 95м ³	1	
21	Шлюзовый питатель	1	
22	Пневмокамерный насос	2	1 в работе, 1 в резерве
23	Кран опорный однобалочный, грузоподъемность 15т	1	
	Участок смешивания фабрики окомкования		
24	Силос, общий объем 40м ³	1	
25	Конвейер винтовой, производительность 4-15 т/ч	1	

4.7 Выводы по главе 4

1. В результате анализа режимов термообработки окатышей ОЖК на действующей обжиговой машине №2 при полупромышленных исследованиях на ФОК АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева» и выявления количественной зависимости времени выдержки низа слоя окатышей от высоты слоя окатышей и производительности обжиговой машины, была разработана методика проведения полупромышленных исследований.
2. Автором была разработана методика экспериментальных исследований и выполнены данные исследования, с целью расчета коэффициента пересчета прочности на сжатие лабораторных окатышей, обожженных в вертикальных пробниках на ОМ №2 на прочность в условиях производства окатышей на обжиговой машине №2 ФОК АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева». Для использования в математической модели данный коэффициент составил – 0,85.
3. Показатели качества обожженных окатышей с использованием доизмельченного концентрата ОЖК не выше чем у окатышей с использованием исходного концентрата ОЖК, таким образом справедливо заключить, что показатель удельной поверхности концентрата ОЖК - 2500 см²/г является оптимальным для этого концентрата, и не требует дальнейшего доизмельчения, даже с целью частичного удаления гидрофобной пленки (результат флотационного обогащения) с зерен концентрата ОЖК.
4. Анализ проведенных исследований металлургических свойств обожженных окатышей ОЖК показывает, что восстановимость опытных окатышей находится в диапазоне 60-80%, что указывает на резерв по улучшению этого показателя. Прочность опытных окатышей при низкотемпературном восстановлении соответствует рекомендациям (> 80%) для всех проб. Требования по температурному интервалу соблюдаются для всех проб опытных окатышей.
5. По совокупным характеристикам проба №2 окатышей полностью соответствует предъявляемым требованиям к металлургическим свойствам железорудного сырья для доменного процесса. Таким образом, можно заключить о целесообразности дальнейшего передела данных окатышей.
6. С учетом анализа проведенных полупромышленных исследований и наличия актуальности перспективы производства конкурентоспособного продукта, к дальнейшей адаптации математической модели с целью определения параметров производства окатышей ОЖК на обжиговых машинах ФОК (фабрики окомкования) АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева», обоснованно определены типы окатышей, представленные в таблице 4.2, 4.10, 4.11 с исходными данными для математической модели ООО «НПВП ТОРЭКС».
7. Развита математическая модель ООО «НПВП ТОРЭКС». Развитие осуществлено посредством включения в расчет блока горения углерода, в результате чего представилась возможность подбора дополнительных коэффициентов адаптации модели: предэкспоненциальный множитель горения углерода и энергия активации горения углерода - данное позволяет учитывать ввод коксика в шихту в перспективе внедрения в производство концентрата ОЖК. Так же, в математическую модель, для

- исходных данных, включен коэффициент пересчета прочности обожженных окатышей из вертикального пробника на окатыши с производства.
8. Разработаны режимные параметры производства обожженных окатышей из концентрата ОЖК Михайловского месторождения на обжиговых машинах АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева» с использованием математической модели ООО «НПВП ТОРЭКС». На основании полученных параметров таблиц 4.12, 4.13 и рисунков 4.22, 4.23, представляется возможность компетентно инициировать производство окатышей ОЖК на ФОК АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева» с частичным прогнозированием затрат.
 9. Расчетами математической модели обосновано добавление коксика на этапе смешивания шихты для термообработки окатышей ОЖК.
 10. Полный перечень результатов расчета математической модели ООО «НПВП ТОРЭКС» по всем 7-ми вариантам таблицы 4.10 является доступным для АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева» для перспективы внедрения в производство концентрата ОЖК. Отображение всех результатов расчета в данной работе – излишне, так как результаты несут сугубо прикладной, внедренческий характер.
 11. В результате расчетов математической модели, при внедрении в производство окатышей ОЖК не потребуется реконструкция и модернизация обжиговых машин АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева» в силу возможности производства окатышей ОЖК на действующих тепловых схемах ОМ. Таким образом, представляется возможность экономии финансовых средств.
 12. Разработаны технические и технологические решения для производства окатышей с использованием концентрата ОЖК Михайловского месторождения на ФОК АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева».

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 машине 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.

Перспективы дальнейшей разработки темы исследования

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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Стратегия развития черной металлургии России на 2014 — 2020 годы и на перспективу до 2030 года. Утверждена приказом Министерства промышленности и торговли Российской Федерации от 5 мая 2014 г. № 839.
- 2 Шульц, Л.А. Долгосрочный прогноз развития технологии массового производства стали. / Л.А. Шульц // Черная металлургия. — 2008. — №11. — С. 40-48.
- 3 Яковлева, Т.А. Исследование возможности получения высококачественных концентратов из окисленных железистых кварцитов методами магнитной сепарации / Т.А. Яковлева, А.А. Управителева, В.А. Абурова // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2019. — № 4 (11). — С. 92-97.
- 4 Фильчаков, Ю.В. Экологическое состояние природных ресурсов в зоне функционирования хвостохранилища Михайловского ГОКа КМА: дис. на соиск. уч. ст. канд. сельскохозяйств. наук: 03.00.16 / Фильчаков Юрий Владимирович. — М. : «Экология», 2008.
- 5 Голеньков, Д.Н. Расширение минерально—сырьевой базы железных руд за счет вовлечения в переработку окисленных железистых кварцитов / Д.Н. Голеньков, А.В. Чантурия, Э.В. Шелепов, Т.В. Игнатова // Проблемы и перспективы эффективной переработки минерального сырья в 21 веке (Плаксинские чтения – 2019): Материалы Международного совещания. Иркутск, 9—14 сентября 2019 г., с.278-280.
- 6 Варичев, А.В. Крупномасштабное производства железорудной продукции в Российской Федерации / А.В. Варичев, С.И. Кретов, В.Ф. Кузин; под науч. ред. В.Ф. Кузина. — М.: Издательство «Горная книга», Издательство Московского государственного горного университета, 2010. — 395 с.
- 7 Бересневич, П.В. Аэрология карьеров справочник. / П.В. Бересневич, В.А. Михайлов, С.А.С. Филатов. — М. : Недра, 1990. — 280 с.
- 8 Токмаков, П.И. Экология и охрана природы при открытых горных работах. / П.И. Токмаков. — М. : Изд—во Моск. гос. горного ун—та, 1994. — 418 с.
- 9 Абзалов, В.М. Газодинамика слоя сырых окатыше на обжиговой машине. / В.М. Абзалов, В.И. Клейн, В.Н. Леушин, С.В. Шаврин // Сталь. — 2003. — №1. — С. 17-20.
- 10 Кокорин, Л.К. Производство окисленных окатышей / Л.К. Кокорин, С.Н. Лелеко. — Екатеринбург : Уральский центр ПР и рекламы, 2004. — 280 с.
- 11 Юсфин, Ю.С. Обжиг железорудных окатышей / Ю.С. Юсфин, Т.Н. Базилевич. — М. : Металлургия, 1973. — 272 с.
- 12 Маерчак, Ш. Производство окатышей. Пер. со словац. / Ш. Маерчак. — М.: Металлургия, 1982. — 232 с.
- 13 Абзалов, В. М. Разработка обжиговой конвейерной машины нового поколения. / В.М. Абзалов, В.В. Брагин, А.А. Вяткин, С.Н. Евстюгин, С.Н. Лелеко // Сталь. — М., 2008. — № 12. — С. 13–14.
- 14 Брагин, В.В. Разработка и внедрение энергоэффективных тепловых схем конвейерных машин для обжига железорудных окатышей: дис. ...канд. техн. наук : 05.16.02 / Брагин Владимир Владимирович. — Екатеринбург, 2013. — 161 с.
- 15 Патент 2078837 РФ. Способ термообработки железорудных окатышей на обжиговой конвейерной машине / Г.М. Майзель, В.И. Клейн, В.М. Абзалов и др. / Изобретения. Заявки и патенты. 1997.

- 16 Абзалов, В.М. 1222694 СССР. Способ сушки окатышей на обжиговых машинах конвейерного типа / В.М. Абзалов, Я.Л. Белоцерковский, В.А. Тверитин и др. / Открытия. Изобретения. 1986. № 13.
- 17 Абзалов, В.М. 1525423 СССР. Обжиговая машина конвейерного типа / В.М. Абзалов, Г.Х. Бойко, Г.М. Майзель и др. / Открытия. Изобретения. 1989. № 44.
- 18 Майзель, Г.М. Обжиговая конвейерная машина. / Г.М. Майзель, В.М. Абзалов, С.Н. Евстюгин. Пат. № 95P8519 DE Германия от 31.03.95; пат. № 70166 (Австралия) от 20.03.96; пат. 396/2583 (ЮАР) от 10.03.96.
- 19 Абзалов, В.М. Тепловая работа обжиговых конвейерных машин ООО «НПВП ТОРЭКС» / В.М. Абзалов, С.Н. Евстюгин, В.И. Клейн. 2012г.
- 20 Юрьев, Б.П. Исследование механизма и кинетики процесса диссоциации гематита в железорудных окатышах при их термообработке. / Б.П. Юрьев, В.А. Дудко, Е.А. Никоненко // Металлы. — 2022. — №3. — С. 24-31.
- 21 Юрьев, Б.П. Оптимизация процесса обжига железорудных окатышей на конвейерной машине с учетом физико—химических процессов, протекающих в слое. / Б.П. Юрьев, В.А. Дудко // Сталь. — 2020. — №9. — С. 2—7.
- 22 Пузанов, В.П., Кобелев В.А. Структурообразование из мелких материалов с участием жидких фаз. / В.П. Пузанов, В.А. Кобелев. – Екатеринбург: 2001. — 634 с.
- 23 Евстюгин, С.Н. Исследование теплотехнических характеристик спекания окатышей различного химического состава. / Евстюгин Сергей Николаевич. Дис. на соиск. уч. ст. к.т.н. Свердловск. 1981, ВНИИМТ.
- 24 Ярошенко, Ю.Г. Теплофизические основы тепловой работы металлургических слоевых печей и агрегатов: Учебное пособие / Ю.Г. Ярошенко, В.С. Швыдкий, Н.А. Спириин, В.И. Матюхин, В.В. Лавров // Екатеринбург: УрФУ. 2019. 464 с.
- 25 Горбачев, В.А. Влияние состава шихты на структуру и фазовый состав обожженных окатышей. / В.А. Горбачев, Н.Н. Копоть, Г.Г. Розенко, Т.В. Сапожникова, А.В. Шаврин // Сталь. – 2002. — №4. – С. 24-27.
- 26 Алексеев, Л.Ф. Структура и разрушение окатышей при восстановлении. / Л.Ф. Алексеев, В.А. Горбачев, Д.З. Кузнецов, С.В. Шаврин. // М.; Наука, 1983. 78 с.
- 27 Брагард, А. Производство окатышей из офлюсованных рудных смесей. / А. Брагард, Л. Мэтью. // Черные металлы, 1972, №3. С. 15–22.
- 28 Журавлев, Ф.М. Окатыши из концентратов железистых кварцитов. / Ф.М. Журавлев, Т.Я. Малышева. // М.; Металлургия, 1991. 126 с.
- 29 Некрасов, З.И. О природе шлаковой связки железорудных окатышей. / З.И. Некрасов, Г.М. Дроздов, Ю.С. Шмелев и др. // Сталь, 1978, №8. С. 688-695.
- 30 Корнилова, Н.К. Восстановимость как характеристика качества железорудного материала и способы ее измерения. / Н.К. Корнилова, Ф.М. Журавлев, А.М. Чернышев. // Сталь, 1986, №1. С. 9-12.
- 31 Малышева, Т.Я. Вещественный состав и прочность окатышей при упрочняющем обжиге и восстановлении. / Т.Я. Малышева, Ф.М. Журавлев, А.М. Чернышев. // Изв. АН СССР, Металлы, 1972, №3. С. 6-9.
- 32 Горбачев, В.А. Изучение влияния свойств бентонитовых глин на формирование качества железорудных окатышей. / В.А. Горбачев, С.Н. Евстюгин, В.Е. Мальцева, Д.Ю. Усольцев. // Сталь. – 2003. — №1. – С. 15-16.

- 33 Абзалов В.М. Оптимизация режима термообработки окатышей на конвейерных обжиговых машинах. / В.М. Абзалов, А.В. Кононыхин, Г.С. Лихачев, В.С. Селезнев, Л.И. Леонтьев. // Сталь. – 2002. — №4. – С. 11-13.
- 34 Тулин, Н.А. Развитие бескоксовой металлургии. / Н.А. Тулин, В.С. Кудрявцев, С.А. Пчелкин. // М.; Металлургия, 1987, 327 с.
- 35 Юсфин, Ю.С. Новые способы получения металла. / Ю.С. Юсфин, А.А. Гиммельфарб, Н.Ф. Пашков. // М.; Металлургия, 1994, 320 с.
- 36 Майер, К. Разрушение богатых железом окатышей в процессе восстановления. / К. Майер, Г. Рауш, М. Отгов. // Черные металлы, 1967, № 11, стр. 12-18.
- 37 Корнилова, Н.К. Восстановимость как характеристика качества железорудного материала и способы ее измерения. / Н.К. Корнилова, Ф.М. Журавлев, А.М. Чернышев. // Сталь, 1986, № 1, стр. 9-12.
- 38 Евстюгин, С.Н. Спекание железорудных материалов в неизотермических условиях. / С.Н. Евстюгин, Л.Ф. Алексеев, В.А. Горбачев. // Известия ВУЗов. ЧМ, 1981, № 2, стр. 21-24.
- 39 Юрьев, Б.П. Анализ способов производства окатышей и разработка технологии получения их с высокими металлургическими свойствами. / Б.П. Юрьев, В.А. Гольцев, В.А. Дудко // Сталь. – 2020. — №7. – С. 2-7.
- 40 Рыженков, А.Н. Пылеугольное топливо – безальтернативная перспектива доменного производства в Украине. / А.Н. Рыженков, А.А. Минаев, С.Л. Ярошевский, Б.П. Крикунов, В.М. Замуруев, А. И. Дрейко. // Сталь. – 2010. — №10. – С. 7-13.
- 41 Симонов, Ю.Н. Металлургические технологии : учебник / Ю.Н. Симонов, С.А. Белова, М.Ю. Симонов. Издательство ПНИПУ. Пермь 2012г. // 293с.
- 42 Берсенева, И.С. Агломерация окисленных железистых кварцитов. / И.С. Берсенева, А.Ю. Петрышев, Н.А. Майстренко, А.С. Лопатин, Н.К. Анисимов // Сталь, 2016, №12, С.2-7.
- 43 Поколенко, С.И. Закономерности окомкования и сушки окатышей из гематитового концентрата / С.И. Поколенко, И.С. Вохмякова, Ю.Г. Ярошенко, В.И. Матюхин, С.Н. Гушин, Г.А. Зинягин // Сталь. – 2010. — №9. – С. 44-45.
- 44 Стародумов, А.В. Влияние минералогического состава на комкующую способность шихты. / А.В. Стародумов, Р.А. Полуяхтов, А.В. Судай, М.А. Воробьев, Т.В. Сапожникова // Сталь. – 2006. — №6. – С. 15-17.
- 45 Берсенева, И.С. Утилизация железосодержащих отходов магнитного обогащения – окисленных железистых кварцитов КМА / И.С. Берсенева, И.Г. Бормотова, И.С. Вохмякова, Р.И. Исмагилов, М.Н. Нафталъ, Ю.Г. Ярошенко // Труды Конгресса с международным участием и Конференции молодых ученых «Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований (ТЕХНОГЕН—2017)», V Форума «Уральский рынок лома, промышленных и коммунальных отходов». – Екатеринбург: УрО РАН, 2017, С.193-196.
- 46 Абзалов, В.М. Физико-химические и теплотехнические основы производства железорудных окатышей. / В.М. Абзалов, В.А. Горбачев, С.Н. Евстюгин, В.И. Клейн, Л.И. Леонтьев, Б.П. Юрьев. Под ред. академика Леонтьева Л.И. Екатеринбург, 2012. 340с.
- 47 Юрьев, Б.П. Изучение механизма и кинетики восстановления гематита. / Б.П. Юрьев, В.А. Дудко // Химическая физика. – 2022. – Т. 41. — №1. – С. 17-24.

- 48 Меламуд, С.Г. Изучение процесса диссоциации гематита при обжиге железорудных окатышей. / С.Г. Меламуд, Б.П. Юрьев, Н.А. Спирин. // Изв. вузов. Черн. металлургия. 2010. № 12. С. 9-12.
- 49 Братчиков, С.Г. Изучение кинетики окисления окатышей Качканарского ГОКа / С.Г. Братчиков, В.М. Абзалов, Б.П. Юрьев. // Известия АН СССР. Металлы, 1978. № 1. С. 46-52.
- 50 Способ термообработки железорудных окатышей. А.с. №870465. Бюллетень № 36, 30.09.87.
- 51 Кретов, С.И. Обжиговая машина нового поколения — инструмент клиентоориентированного производства окатышей. / С.И. Кретов, А.В. Козуб, С.П. Пигарев, В.В. Брагин, А.И. Груздев, А.В. Варичев, А.А. Угаров, А.Л. Кузнецов, А.А. Лавриненко // Сталь. — 2017. — №12. — С. 13-18.
- 52 Винтовкин, А.А. Технологическое сжигание и использование топлива. / А.А. Винтовкин, М.Г. Ладыгичев, Ю.М. Голдобин, Г.П. Ясников. — М.: Металлургия, 1998. 286 с.
- 53 Швыдкий, В.С. Физико-химические аспекты расчета процесса обжига рудоугольных окатышей на конвейерной машине. Известия высших учебных заведений. / В.С. Швыдкий, Ю.Г. Ярошенко, Н.А. Спирин, В.В. Лавров. // Черная Металлургия. — 2018. — Т. 61, №4. — С. 288-293.
- 54 Швыдкий, В.С. Математическая модель процесса обжига рудо-угольных окатышей на конвейерной машине / В.С. Швыдкий, Ю.Г. Ярошенко, Н.А. Спирин, В.В. Лавров. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. — 2017. — Т. 60, №4. — С. 329-335.
- 55 Юрьев, Б.П. Основы теории процессов при обжиге железорудных окатышей: научная монография / Б.П. Юрьев, Л.Б. Брук, Н.А. Спирин, О.Ю. Шешуков, В.А. Гольцев, О.И. Шевченко, А.А. Метелкин; М—во образования и науки РФ; ФГАОУ ВО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», Нижнетагил. технол. ин—т (фил.). — Нижний Тагил : НТИ (филиал) УрФУ, 2018. — 310 с.
- 56 Ладыгичев, М.Г. Тепловые режимы обжига железорудных окатышей с применением твердого топлива. Режим и конструктив. Параметры тепловых металлургических агрегатов. / М.Г, Ладыгичев, Я.Л. Белоцерковский, Е.М. Цивилева. // М.:1986. С. 13-14.
- 57 Вохмякова, И.С. Закономерности окомкования окатышей из гематитового концентрата / И.С. Вохмякова, С.Н. Гуцин, В.А. Горбачёв [и др.] // Инновации в материаловедении и металлургии: материалы I междунар. интерактив. науч.—практ. конф. [13-19 дек. 2011 г., г. Екатеринбург]. — Екатеринбург: Изд—во Урал. ун-та, 2012. — Ч. 2. — С. 224-225.
- 58 Бережной, Н.Н. Промышленные испытания технологии производства железорудных окатышей из шихты с твердым топливом. / Н.Н. Бережной, А.А. Паталах, Н.Н. Гребенкин и др. // Сталь. 1982. № 11, С. 10—12.
- 59 Клейн, В.И. Некоторые аспекты обжига и охлаждения рудоугольных окатышей на конвейерном агрегате. Теплотехническое обеспечение основных металлургических производств. / В.И. Клейн, Е.М. Чернышова, В.Р. Кузнецов, В.А. Тверитин. // Сб. научн. трудов ВНИИМТ. М.; Металлургия, 1990, с.37-45.

- 60 Копырин, И.А. Производство окатышей различной основности. / И.А. Копырин, Ю.М. Борц, И.Ф. Граур. // М.: Metallurgy, 1975. 192 с.
- 61 Буткарев, А.П. Принципы построения математических моделей в АСУТП производства железорудных окатышей. / А.П. Буткарев, Е.В. Некрасова, Н.Г. Машир, Ю.В. Сиверин. // Сталь, 1990, №3, с.15-21.
- 62 Боковиков, Б.А. Универсальная математическая модель тепломассообмена в слое при обжиге окатышей на конвейерной машине. / Б.А. Боковиков, В.М. Майзель, В.В. Брагин. // Сталь. – 2002. — №4. – С. 29-34.
- 63 Боковиков, Б.А. Теплофизические закономерности термообработки железорудных окатышей на конвейерной машине (математическое моделирование) / Б.А. Боковиков, В.В. Брагин, С.Н. Евстюгин, В.М. Малкин, М.И. Найдич, А.А. Солодухин. Под ред. Б.А. Боковикува. // Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2013. 200с.
- 64 Боковиков, Б.А. Математическая модель обжиговой конвейерной машины как инструмент для оптимизации тепловой схемы агрегата / Б.А. Боковиков, В.В. Брагин, В.М. Малкин, М.И. Найдич, А.А. Солодухин // Сталь. – 2010. — №9. – С. 33-37.
- 65 Клейн, В.И. Исследование влияния состава газовой среды при обжиге на качество окатышей. / В.И. Клейн, В.М. Абзалов, В.А. Тверитин, Ю.Г. Ярошенко. // Metallurgical heat engineering. Темат. отр. сб., №9 МЧМ СССР, ВНИИМТ. М.; Metallurgy, 1981. С. 10-14.
- 66 Буткарев, А.П. К вопросу о предельных скоростях охлаждения однофазных и двухфазных окатышей. Сообщение 1. / А.П. Буткарев, В.А. Горбачев, Г.М. Майзель и др. // Изв. Вузов, Черная металлургия. 1978, № 10. С. 36-39.
- 67 Берсенева, И.С. Перспективы использования гематитовых руд для производства железорудного сырья. / И.С. Берсенева, Р.А. Полуяхтов, В.А. Горбачев, М.П. Ершов, Г.А. Зинягин, Ю.Г. Ярошенко. // Сталь, 2008, №12, с.14-16.
- 68 Берсенева, И.С. Исследование металлургических свойств окатышей из гематитовой руды Большетроицкого месторождения. / И.С. Берсенева, В.А. Горбачев, А.В. Судай, Т.В. Сапожникова, Г.А. Зинягин // Теория и технология металлургического производства. – 2013. — №1 (13). — С. 3-4.
- 69 Варичев, А.В. Инновационные решения в производстве железорудного сырья на михайловском ГОКе. / А.В. Варичев, А.А. Угаров, Н.Т. Эфендиев, С.И. Кретов, А.А. Лавриненко, А.А. Солодухин, П.В. Пузаков // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. — №5. – С. 141-153.
- 70 Евстюгин, С.Н. Сравнительный анализ использования различных видов связующего при производстве окатышей в ОАО «Михайловский ГОК». / С.Н. Евстюгин, Д.Ю. Усольцев, В.И. Минеев, И.Г. Бормотова, С.В. Шаврин // Сталь. – 2005. — №2. – С. 12-15.
- 71 Каплун, Л.И. Теплофизические характеристики шихтовых железорудных материалов: Учебное пособие / Л.И. Каплун, В.М. Абзалов. Екатеринбург: УПИ. 1991. 124 с.
- 72 Коротич, В.И. Теоретические основы окомкования железорудных материалов. / В.И. Коротич. // — М.: Metallurgy, 1966, 152 с.
- 73 Мальцева, В.Е. Закономерности формирования прочностных характеристик сырых и сухих окатышей. / В.Е. Мальцева, Ю.Г. Макаров, Г.М. Майзель, С.В. Шаврин. // Сталь. – 2003. — №9. – С. 7-10.

- 74 Воеводин, Л.И. Перспективы использования интерполимерных связующих при производстве железорудных окатышей. / Л.И. Воеводин, Б.Г. Виничук, Л.П. Вахрушев, Е.Б. Беленко, Д.Ю. Усольцев, А.В. Судай. // Сталь. – 2008. — №12. – С. 43-46.
- 75 Беленко, Е.Б. Теоретические основы механизма формирования качества сырых окатышей с полимерными добавками в составе комплексного связующего. / Е.Б. Беленко, Л.П. Вахрушев, Л.И. Воеводин, В.А. Горбачев, Д.Ю. Усольцев // Сталь. – 2005. — №2. – С. 15-17.
- 76 Горбачев, В.А. Роль бентонито-полимерной композиции в формировании металлургических свойств окатышей. / В.А. Горбачев, Д.Ю. Усольцев, И.Г. Бормотова, А.В. Шаврин, Т.В. Сапожникова. // Сталь. – 2005. — №2. – С. 19-21.
- 77 Шаврин, А.В. Использование бентонито—полимерных композиций – резерв улучшения металлургических свойств окатышей. / А.В. Шаврин, И.Г. Бормотова, С.В. Шаврин, Т.В. Сапожникова. // Сталь. – 2005. — №2. – С. 21-23.
- 78 Усольцев, Д.Ю. Эффективность использования бентонито- и интерполимерных композиций при производстве железорудных окатышей. / Д.Ю. Усольцев, Е.Б. Беленко, Б.Г. Виничук, В.Н. Леушин, В.И. Минеев, Н.Н. Путалов. // Сталь. – 2006. — №6. – С. 10-12.
- 79 Горбачев, В.А. Композиции бентонита и полимера – новый вид связующего для железорудных окатышей. / В.А. Горбачев, В.П. Бруев, Л.П. Вахрушев, Л.И. Воеводин, В.И. Минеев, Д.Ю. Усольцев. // Сталь. – 2003. — №9. – С. 3-4.
- 80 Майзель, Г.М. Изучение некоторых закономерностей работы барабанных окомкователей с индивидуальным грохочением. / Г.М. Майзель, И.Г. Бормотова, А.В. Стародумов, С.П. Гоняев // Сталь. – 2003. — №9. – С. 30-32.
- 81 Коротич, В.И. Теоретические основы окомкования железорудных материалов. / В.И. Коротич. // М.: Металлургия, 1966, 211 с.
- 82 Бережной, Н.Н. Окомкование тонкоизмельченных концентратов железных руд. / Бережной Н.Н., Губин Г.В., Л.А. Дрожилов Л.А // М.: недра, 1971, 174 с.
- 83 Исаев, Е.А. Современная теория окомкования сыпучих материалов. / Е.А. Исаев, И.Е. Чернецкая, Л.Н. Крахт. // Ст. Оскол: Тонкие наукоемкие технологии, 2001, 244 с.
- 84 Исаев, Е.А. Исследование некоторых режимов окомкования в лабораторном барабанном окомкователе. / Е.А. Исаев, В.М. Онищенко. // Изв. вузов. Черная металлургия, 1979, № 4, с.128-132.
- 85 Каменов, А.Д. Комплексное моделирование агломерации и окомкования руд. / А.Д. Каменов. // М., Металлургия, 1978, 360 с.
- 86 Абзалов, В.А. Характер разрушения железорудных окатышей в процессе интенсивной сушки. / В.М. Абзалов, А.В. Кононыхин, В.С. Лихачев, А.А. Солодухин // Сталь. – 2003. — №1. – С. 20-22.
- 87 Вохмякова, И.С. Исследование некоторых закономерностей процесса окомкования гематитовых концентратов. / И.С. Вохмякова, С.И. Поколенко, Р.А. Полуяхтов, Г.Г. Бардавелидзе, С.Н. Гущин // Сталь. – 2010. — №9. – С. 30-31.
- 88 Абзалов, В.А. Физические свойства исходных железорудных окатышей. / В.М. Абзалов, А.В. Стародумов, Г.М. Майзель // Сталь. – 2003. — №9. – С. 10-12.
- 89 Лыков, А.В. Теория тепломассообмена. / А.В. Лыков. М.: Высшая школа, 1979, 495 с.

- 90 Гольдштейн, М.Н. Механические свойства грунтов. / М.Н. Гольдштейн. М.: Гостехиздат, 1952, 281 с.
- 91 Лебедев, А.Ф. Почвенные и грунтовые воды. / А.Ф. Лебедев. М.: Изд—во АН СССР, 1936, 142 с.
- 92 Витюгин, В.М. Методика расчета оптимальной влажности для окомкования дисперсных материалов/ В.М. Витюгин, А.С. Богма, П.Н. Докучаев. // Изв. ТПИ. – 1974. – Т. 215. – С. 70-71.
- 93 Полуяхтов, Р.А. Сравнительный анализ условий транспортировки сырых окатышей разных фабрик окомкования. / Р.А. Полуяхтов, А.А. Солодухин, А.В. Стародумов, И.Г. Бормотова, Н.Н. Путалов, А.А. Шевченко. // Сталь. – 2005. — №2. – С. 11-12.
- 94 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. Спиринов. // В сборнике: *Металлургия: технологии, инновации, качество. Труды XXII Международной научно—практической конференции. В 2—х частях. Под общей редакцией А.Б. Юрьева. Новокузнецк. — 2021. — С. 32-37.*
- 95 Авдеенко, А.А. Методика определения скоростей фильтрации на обжиговой машине конвейерного типа. / А.А. Авдеенко, В.В. Брагин, М.А. Воробьев, С.Н. Евстюгин, А.А. Кучин // Сталь. – 2003. — №9. – С. 32-33.
- 96 Братчиков, С.Г. Теплотехника окускования железорудного сырья. / Братчиков С.Г., Берман Ю.А., Белоцерковский Я.Л. и др. М.: Metallurgy, 1970, 343 с.
- 97 Юрьев, Б.П. Разработка рекомендаций по повышению металлургических свойств качканарских окатышей. / Б.П. Юрьев, В.А. Дудко. // Сталь. – 2021. — №1. – С. 2-8.
- 98 Бруев, В.П. Оптимизация состава и структуры окатышей – резерв повышения их металлургических свойств. / В.П. Бруев, С.Н. Евстюгин, С.И. Кретов, А.В. Шаврин, С.В. Шаврин, Т.В. Сапожникова. // Сталь. – 2003. — №9. – С. 5-7.
- 99 Ащеулов, В.Н. Исследование металлургических свойств окатышей из дообогащенных концентратов ОАО ССГПО. / В.Н. Ащеулов, В.А. Горбачев, В.А. Барсов, В.М. Мартыненко, А.В. Шаврин, Т.В. Сапожникова // Сталь. – 2003. — №9. – С. 12-15.
- 100 Усольцев, Д.Ю. Влияние состава и расхода комплексного связующего на металлургические свойства окатышей ОАО «Михайловский ГОК». / Д.Ю. Усольцев, А.В. Шаврин, Н.Н. Копоть, И.Г. Бормотова, С.В. Шаврин, Т.В. Сапожникова. // Сталь. – 2003. — №9. – С. 35-37.
- 101 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.
- 102 Жуков, Ю.С. Закономерности термической диссоциации гематита в железорудных окатышах. / Ю.С. Жуков, Н.Г. Коршунова, В.И. Клейн В.И. и др. // *Известия ВУЗов ЧМ*, 1984, № 8, с. 28-31.
- 103 Вайльдберг, А.Ю. «Пылеулавливание в металлургии». / А.Ю. Вайльдберг, Г.М. Гордон, А.А. Гурвиц, Л.С. Левин, А.А. Меттус. —М.: Metallurgy, 1984. С. 18-19.
- 104 Кармазин, В.В. Магнитные, электрические и специальные методы обогащения полезных ископаемых. / В.В. Кармазин, В.И. Кармазин. – М.: МГГУ, 2005. – 672с.

- 105 Шумская, Е.Н. Разработка эффективной технологии обогащения окисленных железистых кварцитов. / Е.Н. Шумская. // Горный журнал. — 2012. — №11. — С. 52-55.
- 106 Кармазин, В.В. Магнитное обогащение окисленных железистых кварцитов михайловского железорудного месторождения. / В.В. Кармазин, С.Г. Пак, Д.С. Маслов. // Горный информационно—аналитический бюллетень (научно—технический журнал) — 2012. — №12. — С. 212-219.
- 107 Юрьев, Б.П. Разработка технологий для производства железорудных окатышей с высокими металлургическими свойствами: научная монография / Б.П. Юрьев, Н.А. Спиринов, О.Ю. Шешуков, В.А. Гольцев, О.И. Шевченко, А.А. Метелкин; М—во образования и науки РФ; ФГАОУ ВО «УрФУ им. Первого Президента России Б.Н. Ельцина», Нижнетагил. технол. ин—т (фил.). — Нижний Тагил: НТИ (филиал) УрФУ, 2018. — 172с.
- 108 Юрьев, Б.П. Основы теории процессов при обжиге железорудных окатышей: научная монография / Б. П. Юрьев, Л.Б. Брук, Н.А. Спиринов, О.Ю. Шешуков, В.А. Гольцев, О.И. Шевченко, А.А. Метелкин; М—во образования и науки РФ; ФГАОУ ВО «УрФУ им. Первого Президента России Б.Н. Ельцина», Нижнетагил. технол. ин-т (фил.). — Нижний Тагил: НТИ (филиал) УрФУ, 2018. — 310с.
- 109 Белоусов, В.Н. Топливо и теория горения Часть II. Теория горения: Учебное пособие / В.Н. Белоусов, С.Н. Смородин, О.С. Смирнова. Санкт—Петербург: СПбГТУРП. 2011. 139 с.
- 110 Дмитриев, А.Н. Влияние структуры обожженных окатышей на прочность и разрушение при испытании на статическое сжатие / А.Н. Дмитриев, В.Г. Смирнова, Е.А. Вязникова, А.В. Долматов, Г.Ю. Витькина. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. — 2021. — Т. 64. — № 11. — С. 785-792.
- 111 Берсенева, И.С. Формирование структуры и металлургических свойств частично восстановленных окатышей / И.С. Берсенева, И.С. Вохмякова, А.В. Бородин, С.П. Пигарев, О.Г. Сивков, С.А. Загайнов. // Сталь. — 2022. — № 10. — С. 2-11.
- 112 Сысоев, В.И. Влияние основности шихты, включающей новый флотационный концентрат Михайловского ГОК, на агломерационный процесс и качество агломерата. / В.И. Сысоев, Г.З. Магасумов, А.В. Дзюба, А.С. Харченко, С.К. Сибагатуллин, И.М. Потапов, И.В. Решетова. // Технологии металлургии, машиностроения и материалобработки. — 2022. — № 21. — С. 20-30.

Приложение А. Акт использования результатов работы

Приложение А



ТОРЭКС®

РОССИЯ
ООО «НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ВНЕДРЕНЧЕСКОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ ТОРЭКС»

ООО «НПВП ТОРЭКС»

620902, Екатеринбург, ул. Старожилов, 72

тел. (343) 211-06-53; E-mail: npvp@torex-npvp.ru

ПОДТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ООО «НПВП ТОРЭКС»
Солодухин А.А.

« 14 / 09 / 2024 г. »

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы

Аспирант кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии» Института новых материалов и технологий ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» Бардавелидзе Гога Гурамович, в период выполнения диссертационного исследования работал в должности ведущего инженера ООО «НПВП ТОРЭКС». Результаты диссертационного исследования были им использованы в рамках трудовой деятельности при выполнении договорных обязательств между ООО «НПВП ТОРЭКС» (г. Екатеринбург) и АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева» (г. Железногорск, Курская обл.) по следующим работам:

- 1) «Уточнение технологических параметров производства железорудных окатышей высокого качества с использованием концентратов окисленных железистых кварцитов на обжиговых машинах ОМ-1,2,3 с учетом уточненных параметров схемы их обогащения», 2019г.
- 2) «Определение условий производства железорудных окатышей из тонкоизмельченных концентратов», 2019г.
- 3) «Подбор рецептуры DR и BF окатышей АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева» из концентрата, полученного методом флотационного дообогащения», 2020г.
- 4) «Разработка путей улучшения качества сырых и обожженных окатышей за счет корректировки технологии подготовки флюсующих компонентов», 2021г.
- 5) «Разработка технологии производства железорудных окатышей с качественными показателями, отличными от существующих ТУ, в соответствии с требованиями потребителей», 2023г.

В рамках выполняемых работ соискателем (Г.Г.Бардавелидзе) были разработаны новые технологические решения, которые были использованы менеджментом АО «Михайловский ГОК им. А.В. Варичева» для формирования долгосрочных инвестиционных планов. Кроме того, методология адаптации результатов полупромышленных экспериментов к условиям действующего производства с 2019 года по настоящее время используется в ООО «НПВП ТОРЭКС» при проведении исследований на действующем производстве.

Технический директор, к.т.н.

Руководитель научно-аналитического отдела, к.т.н.

Брагин В.В.

Берсенева И.С.

Приложение Б. Характеристика анализатора HELOS

Характеристика анализатора HELOS



Рисунок Б.1 – Седиментационный анализатор HELOS

Назначения и области применения

Анализаторы размеров частиц лазерные дифракционные HELOS (модели: HELOS/BF(S)-OM, HELOS/BF(S)-MAGIC, HELOS/KF(S)-OM, HELOS/KF(S)-MAGIC, HELOS/KF-VARIO) (далее – анализаторы) предназначены для измерения размеров частиц в порошках, суспензиях при гранулометрическом анализе.

Область применения: металлургическая, горнодобывающая, химическая, фармацевтическая, парфюмерная промышленности, цементное производство, кондитерские предприятия и другие.

Принцип действия анализаторов основан на изменении параметров углового распределения дифракции лазерного излучения на частицах.

Конструктивно анализаторы состоят из трех основных блоков: блока с источником лазерного излучения; оптического блока с системой регистрации дифракционных картин с помощью светодиодной матрицы; диспергирующего блока, в котором исследуемые материалы распыляются и поток распыленных частиц направляется в область лазерного излучения. Диспергирующие блоки сменные в зависимости от решаемой задачи и вида материала. Применяются следующие конструкции: Rodos/M, Rodos, Gradis, Megagradis – для диспергирования порошков: Sucell, Sucell/M, Quixel, Cuvette, - для диспергирования суспензий и эмульсий: Sprayer, Inhaler – для диспергирования спреев, аэрозолей; Oasis – универсальный комбинированный блок. Выпускается пять моделей, которые отличаются диапазонами измерений, геометрическими размерами (для решения некоторых практических задач), наличием дополнительных оптических модулей, которые позволяют автоматизировать выбор диапазонов измерений. Указанный ряд моделей анализаторов

HELOS позволяет провести анализ гранулометрического состава в диапазоне показаний размеров частиц от 0,1 до 8750 мкм.

Результаты измерений представляются в виде таблиц с указанием допустимых границ размеров частиц, ниже которых находится 10%, 50% и 90% частиц. По заказу потребителей могут быть установлены дополнительные границы 16%, 84% или другие.

В таблице представлены основные технические характеристики моделей данного прибора.

Управление работой анализатора, обработку результатов измерений осуществляет персональный компьютер в соответствии с управляющей программой. На экране отображаются режим работы, результаты текущих измерений, результаты статистической обработки данных, диаграммы и графические изображения процесса измерения.

Таблица Б.1 – Основные технические характеристики моделей

Технические характеристики	Наименования модели		
	HELOS/BF(S)-OM, HELOS/BF(S)- MAGIC	HELOS/KF(S)-OM, HELOS/KF(S)- MAGIC	HELOS/KF-VARIO
Диапазоны измерений размеров частиц, мкм	1,0 – 875,0	1,0 - 1000	1,0 - 1250
Диапазон показаний размеров частиц, мкм	0,1 - 850	0,1 - 8750	0,1 - 8750
Пределы допускаемой абсолютной погрешности в диапазоне измерений от 1,0 до 10,0 мкм вкл., мкм	$D_{10} \pm 0,3^*$ $D_{50} \pm 0,5^*$ $D_{90} \pm 0,8^*$		
Пределы допускаемой относительной погрешности в диапазоне измерений св. 10 до 1250 мкм вкл., %	$D_{10} \pm 12,0^*$ $D_{50} \pm 10,0^*$ $D_{90} \pm 12,0^*$		
Мощность He-Ne лазера, мВт	5		
Длина волны лазерного излучения, нм	632,8		
Параметры эклектического питания:	переменный ток напряжением 220 ± 15 частотой 50 Гц		
Габаритные размеры, мм	705x210x322	1100x210x322	2375**x334x467
Масса, кг. не более	30	55	75

* D_{10} , D_{50} , D_{90} - размер частиц, соответствующий границе распределения, ниже которой находится 10%, 50%, 90% частиц, соответственно.

** Указанный параметр изменяется в диапазоне от 2040 до 2375 мм.

Приложение В. Результаты расчета материального баланса «окомкования и обжига»

Результаты расчета материального баланса «окомкования и обжига»

Таблица В.1 – Материальный баланс окомкования и обжига шихтовки №1 (таблица 3.1)

Исходные материалы (сырье)	расход %	вл-сть %	Fe _{общ}	Содержание компонентов в шихтовых составляющих, %																	п.п.п.		
				FeO	FeO*O	Fe ₂ O ₃	Fe _{мет}	FeS/S	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	TiO ₂	Mn	S	C	P	Na ₂ O	K ₂ O	проч.			
Концентрат_ОЖК (ТОМС)	91,30	10,00	66,12	3,98		90,05		0,04	2,10	0,10	0,22	0,71	0,00		0,035	0,38	0,02	0,01	0,04	2,32	2,88		
Бентонит_ОЖК	0,60	6,00	3,51	0,47		4,50			60,20	15,60	2,52	3,58									13,13	6,90	
Коксик	1,00														0,560	84,250					15,19	85,00	
Доломит	7,10								1,82			18,90	34,20									45,08	
																						100,00	
																						100,00	
шихта		9,95	60,38	3,63		82,24		0,04	2,41	0,18	1,56	3,10	0,00		0,038	1,187	0,02	0,01	0,04	5,55	3,52		
Результаты расчета	Масса кг		Fe_{общ}	Масса компонентов шихты, кг																	п.п.п.		
Концентрат_ОЖК (ТОМС)	822,16		543,58	32,69		740,34		0,33	17,29	0,81	1,80	5,85	0,03		0,288	3,10	0,20	0,07	0,33	19,04	23,64		
Бентонит_ОЖК	5,40		0,19	0,03		0,24			3,25	0,84	0,14	0,19									0,71	0,37	
Коксик	9,01														0,050	7,59					1,37	7,65	
Доломит	63,94								1,16		12,08	21,87										26,82	
Сухая шихта (сухие окатыши)	900,50		543,77	32,71		740,58		0,33	21,71	1,65	14,02	27,91	0,03		0,34	10,69	0,20	0,07	0,33	49,94	31,66		
Изменение массы в результате упрочительного обжига (Убыль (-)), Прирост (+))		-27,96				-32,22			36,20		-0,27											-20,67	-31,66
Обоженные окатыши	кг	872,54	543,77	0,50		776,77		0,05	21,71	1,65	14,02	27,91	0,03		0,05		0,18	0,07	0,33	29,27			
	%	100,0	62,32	0,06		89,02		0,01	2,49	0,19	1,61	3,20	0,00		0,01		0,02	0,01	0,04	3,35			

Таблица В.2 – Материальный баланс окомкования и обжига шихтовки №2 (таблица 3.1)

Исходные материалы (сырье)	расход %	вл-сть %	Fe _{общ}	Содержание компонентов в шихтовых составляющих, %																	п.п.п.		
				FeO	FeO*O	Fe ₂ O ₃	Fe _{мет}	FeS/S	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	TiO ₂	Mn	S	C	P	Na ₂ O	K ₂ O	проч.			
Концентрат_ОЖК (ТОМС)	93,12	10,00	66,12	3,98		90,05		0,04	2,10	0,10	0,22	0,71	0,00		0,035	0,38	0,02	0,01	0,04	2,32	2,88		
Бентонит_ОЖК	0,60	6,00	3,51	0,47		4,50			60,20	15,60	2,52	3,58									13,13	6,90	
Известняк_ОЖК	1,00	0,20	0,25	0,01		0,35			2,42	0,60	1,01	52,40										42,60	
Коксик	1,00														0,560	84,250					15,19	85,00	
Доломит	4,28								1,82			18,90	34,20									45,08	
																						100,00	
																						100,00	
шихта		9,95	61,59	3,71		83,88		0,04	2,42	0,19	1,04	2,67	0,00		0,038	1,194	0,02	0,01	0,04	4,75	3,99		
Результаты расчета	Масса кг		Fe_{общ}	Масса компонентов шихты, кг																	п.п.п.		
Концентрат_ОЖК (ТОМС)	838,55		554,41	33,34		755,10		0,33	17,63	0,82	1,84	5,97	0,03		0,293	3,16	0,20	0,07	0,34	19,42	24,11		
Бентонит_ОЖК	5,40		0,19	0,03		0,24			3,25	0,84	0,14	0,19									0,71	0,37	
Известняк_ОЖК	9,01		0,02	0,00		0,03			0,22	0,05	0,09	4,72									3,89	3,84	
Коксик	9,01														0,050	7,59					1,37	7,65	
Доломит	38,54								0,70		7,28	13,18										17,37	
Сухая шихта (сухие окатыши)	900,50		554,62	33,37		755,37		0,33	21,81	1,72	9,35	24,06	0,03		0,34	10,75	0,20	0,07	0,34	42,77	35,97		
Изменение массы в результате упрочительного обжига (Убыль (-)), Прирост (+))		-32,19				-32,86			36,92		-0,28											-24,91	-35,97
Обоженные окатыши	кг	868,31	554,62	0,51		792,29		0,05	21,81	1,72	9,35	24,06	0,03		0,06		0,18	0,07	0,34	17,85			
	%	100,0	63,87	0,06		91,24		0,01	2,51	0,20	1,08	2,77	0,00		0,01		0,02	0,01	0,04	2,06			

Таблица В.3 – Материальный баланс окомкования и обжига шихтовки №3 (таблица 3.1)

Приложение Г. Основные формулы для расчета в математической модели ООО «НПВП ТОРЭКС»

Основные формулы для расчета тепломассообмена в слое в математической модели ООО «НПВП ТОРЭКС»

Система уравнений тепломассообмена в слое окатышей приведена ниже [63]:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial \tau} (c_m \cdot \rho_m \cdot t_m) = \frac{\alpha_F \cdot F}{m} \cdot (T_g - t_m) + \frac{\partial}{\partial h} \left(\lambda_{ca} \cdot \frac{\partial t_m}{\partial h} \right) + Q_m \\ - \frac{\partial}{\partial h} (w_g \cdot c_g \cdot \rho_g \cdot T_g) = \frac{\alpha_F \cdot F}{m} \cdot (T_g - t_m) - Q_g \end{cases}, \quad (\text{Г.1})$$

Здесь c_m, ρ_m, t_m - теплоемкость, насыпная плотность и температура твердой фазы, c_g, ρ_g, T_g - теплоемкость, плотность и температура газа. Q_m - сумма источников или стоков теплоты в твердой фазе, а Q_g - сумма источников или стоков теплоты, образующихся за счет массовых потоков от твердой фазы в газ или обратно. При этом предполагается, что все химические реакции происходят внутри окатышей. Выражения для этих величин приведены далее. Приближенное решение системы уравнений (Д.1) в конечных разностях выглядит так:

$$\begin{cases} t_2 = \frac{t_1 \cdot (1 + \Delta \zeta - \Delta \xi) + 2 \cdot T_1 \cdot \Delta \xi + \bar{Q}_m \cdot (1 + \Delta \zeta) \cdot \Delta \xi + \bar{Q}_g \cdot \Delta \xi \cdot \Delta \zeta}{1 + \Delta \xi + \Delta \zeta} \\ T_2 = \frac{T_1 \cdot (1 + \Delta \xi - \Delta \zeta) + 2 \cdot t_1 \cdot \Delta \zeta + \bar{Q}_g \cdot (1 + \Delta \xi) \cdot \Delta \zeta + \bar{Q}_m \cdot \Delta \xi \cdot \Delta \zeta}{1 + \Delta \xi + \Delta \zeta} \end{cases}, \quad (\text{Г.2}).$$

Здесь сделана замена переменных:

$$\begin{aligned} \Delta \xi &= \frac{\Delta \tau \cdot \alpha_F \cdot F}{m \cdot \rho_m \cdot c_m \cdot K_p}; \quad \Delta \zeta = \frac{\Delta h \cdot \alpha_F \cdot F}{m \cdot c_g \cdot \rho_g \cdot w_g \cdot K_p}; \\ \bar{Q}_m &= \frac{m \cdot K_p \cdot \left(Q_m + \lambda_{ca} \cdot \frac{\partial^2 t_m}{\partial h^2} \right)}{\alpha_F \cdot F}; \quad \bar{Q}_g = \frac{m \cdot K_p \cdot Q_g}{\alpha_F \cdot F}; \end{aligned}, \quad (\text{Г.3}).$$

Поправка K_p характеризует переход от разности температур $T - t$ к разности усредненных значений температур между входом и выходом расчетного участка по высоте слоя и времени соответственно. Она отражает экспоненциальный характер зависимости температуры вертикальной стенки, обдуваемой параллельным ей газовым потоком, от высоты:

$$K_p = \frac{1 + e^{-p}}{1 - e^{-p}} \cdot p; \quad p = \frac{\Delta h \cdot \alpha_F \cdot F}{m \cdot c_g \cdot \rho_g \cdot w_g}, \quad (\text{Г.4}).$$

Коэффициент поверхностного теплообмена α_F вычисляется по формуле:

$$\alpha_F = \frac{\lambda_g}{d} \cdot C \cdot \text{Re}^n, \quad \text{Re} = \frac{\rho_g \cdot W_g \cdot d}{\eta_g}, \quad (\text{Г.5}).$$

Константы C и N задаются в исходных данных модели. Они разные для сухих и влажных окатышей, а также для зоны охлаждения. Коэффициент массивности m в (Г.1) определяется по формуле:

$$m = 1 + \frac{\alpha_F \cdot d}{10 \cdot \lambda_m}, \quad (\text{Г.6}).$$

Удельная поверхность F определяется по формуле

$$F = \frac{6 \cdot (1 - f)}{d}, \quad (\text{Г.7}).$$

Здесь f - порозность слоя окатышей, d - диаметр окатыша. λ_m в (Д.6) - теплопроводность материала окатышей, являющаяся постоянной величиной.

Насыпной слой железорудных окатышей, как правило, обладает значительной порозностью. Поэтому при высокой температуре значительную роль в теплопередаче начинает играть излучение. В связи с этим предполагается, что теплопроводность слоя λ_{cs} (продольная теплопроводность) зависит от температуры. В силу этого равенство (см. (Д.1)):

$$\frac{\partial}{\partial h} \left(\lambda_{cs} \cdot \frac{\partial t}{\partial h} \right) = \lambda_{cs} \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial h^2}, \quad (\text{Г.8}).$$

справедливо лишь, если вторую производную температуры по высоте вычислять, используя в качестве опорных точек температуры $t_n^{(1)}$ и $t_n^{(2)}$ «поверхностей» расчетного участка n по высоте слоя:

$$t_n^{(2)} = \frac{\lambda_n \cdot t_n + \lambda_{n+1} \cdot t_{n+1}}{\lambda_n + \lambda_{n+1}}, \quad (\text{Г.9});$$

$$t_n^{(1)} = \frac{\lambda_n \cdot t_n + \lambda_{n-1} \cdot t_{n-1}}{\lambda_n + \lambda_{n-1}}, \quad (\text{Г.10}).$$

Тогда вторая производная температуры по высоте слоя может быть записана в виде конечных разностей, как

$$\frac{\partial^2 t}{\partial h^2} = 4 \cdot \frac{t_n^{(1)} + t_n^{(2)} - 2 \cdot t_n}{\Delta h^2}, \quad (\text{Г.11}).$$

Для крайних расчетных участков необходимо задать граничные условия, из которых можно получить температуру соответствующей поверхности:

$$t_n^{(s)} = \frac{\frac{\lambda_n \cdot t_n + \frac{\alpha_{ext}}{2} \cdot T_{ext}}{\frac{\lambda_n}{\Delta h} + \frac{\alpha_{ext}}{2}}}{\frac{\lambda_n}{\Delta h} + \frac{\alpha_{ext}}{2}}, \quad (\text{Г.12}).$$

Здесь α_{ext} - коэффициент теплообмена, а T_{ext} - температура внешней среды (внешней по отношению к слою, т.е. это либо температура газа в горне, либо температура поверхности колосников).

Величина суммарного источника тепла в твердой фазе Q_m определяется через источники (стоки) тепла, возникающие, как результат нескольких процессов, которые в общем случае могут протекать одновременно:

- удаление влаги из окатышей (сушка)
- горение углерода
- разложение известняка
- окисление магнетита до гематита и диссоциация гематита
- удаление серы из окатышей (десульфурация)
- частичное плавление окатышей

Практически наличие этих процессов определяется химическим составом и температурой окатышей. Таким образом, суммарный источник тепла в твердой фазе можно представить в виде:

$$Q_m = \sum_{i=1}^5 Q_i^{(m)}, \quad (\text{Г.13}).$$

Выражение для Q_g в основном определяется, как сумма изменений теплосодержания каждого из газообразных компонентов при выделении из твердой фазы или поглощении твердой фазой с учетом различия температур твердой фазы и окружающей атмосферы:

$$Q_g = \sum_{i=1}^5 G_i^{(g)} \cdot (\bar{C}_i(t) \cdot t - \bar{C}_i(T) \cdot T), \quad (\text{Г.14}).$$

Исключение составляет сушка окатышей, где вид выражения для источника в газе более сложный из-за наличия в газе свободной влаги, которая может испаряться и конденсироваться.