

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

На правах рукописи



СЫСОЕВ Виктор Иванович

**РАЗРАБОТКА НАУЧНО ОБОСНОВАННОГО СОСТАВА СПЕКАЕМОЙ
ШИХТЫ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА АГЛОМЕРАТА
И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ АГЛОМАШИН**

Специальность 2.6.2. Metallургия черных, цветных и редких металлов

Диссертация
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Харченко Александр Сергеевич

Магнитогорск – 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ПОСТАНОВКА ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ	12
1.1. Обзор месторождений железных руд Российской Федерации	12
1.1.1. Разрабатываемые месторождения	12
1.1.2. Перспективные месторождения	15
1.2. Metallургические характеристики агломерата и возможности их повышения	16
1.2.1. Прочностные свойства.....	16
1.2.2. Физико-химические свойства	24
1.2.3. Современные технологии обеспечения и повышения качества агломерата.....	26
1.3. Пути повышения производительности агломашин.....	29
1.3.1. Руды и концентраты. Состав основной части шихты	29
1.3.2. Применение связующих добавок	34
Выводы по главе 1.....	35
2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ.....	36
ПО ПОЛУЧЕНИЮ АГЛОМЕРАТА И ИССЛЕДОВАНИЮ ЕГО ФИЗИКО- МЕХАНИЧЕСКИХ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ.....	36
2.1 Подготовка агломерационной шихты к спеканию	36
2.1.1 Компонентный состав агломерационной шихты.....	36
2.1.2 Химический состав компонентов агломерационной шихты.....	39
2.1.3 Гранулометрический состав компонентов агломерационной шихты.....	46
2.1.4 Расчет агломерационной шихты	50
2.1.5 Дозировка компонентов рудной смеси, их предварительное смешение и увлажнение. Закладка рудного штабеля.....	51
2.1.6 Дозировка нерудных компонентов	52
2.1.7 Смешивание и окомкование аглошихты	52
2.2 Производство агломерата.....	54
2.3 Определение удельной производительности аглоустановки и оценка прочности агломерата.....	57

2.4 Оценка свойств агломерата после его восстановления под нагрузкой	59
50 кПа при температурах 500-1100 °С	59
2.4.1 Определяемые показатели.....	59
2.4.2 Технические характеристики оборудования.....	60
2.4.3 Методика проведения испытаний	61
3. ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АГЛОМЕРАЦИОННОГО ПРОЦЕССА В НОВЫХ, СОВРЕМЕННЫХ ШИХТОВЫХ УСЛОВИЯХ РАБОТЫ МАШИН ФАБРИКИ № 5 ПАО «ММК»	64
3.1 Исследование концентратов	64
3.1.1 Результаты спеканий шихт с различными моноконцентратами	64
3.1.2 Двойные и тройные смеси из концентратов Михайловского стандартного, Лебединского и ССГПО	68
3.1.3. Двойные и тройные смеси из концентратов Михайловского флотационного, Лебединского и ССГПО.....	74
3.2 Агломерация шихт с различными видами руд	81
3.2.1 Результаты спеканий шихт из агломерационных руд Михайловского, Богословского и Стойленского ГОКов на основе Михайловского стандартного концентрата.....	81
3.2.2 Результаты спеканий шихт с аглорудами на основе Михайловского флотационного концентрата	87
3.2.3 Вовлечение в состав аглошихты Туканской руды	97
3.3. Производство агломерата на основе рациональных смесей концентратов и аглоруд	104
3.4 Пути повышения качества агломерата вводом в состав шихты различных связующих материалов.....	110
3.4.1 Интерполимерное связующее.....	110
3.4.2 Отходы сероулавливающей установки.....	117
сопротивление годного агломерата удару по содержанию фракции +5 мм после испытания по ГОСТ 15137-77 возросло с 75,5% до 77,5%, или на 2,7% отн. ...	123
3.4.3. Bentonit.....	123

3.4.4 Исследование физико-химических свойств агломерата на основе шихт, включающих различные добавочные материалы, после его восстановления под нагрузкой 50 кПа при температурах 500-1100 °С.....	125
Выводы по главе 3.....	131
4. ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ АГЛОМЕРАЦИОННЫХ МАШИН ФАБРИКИ № 5 ПАО «ММК» НА РАЗРАБОТАННОМ РАЦИОНАЛЬНОМ СЫРЬЕ	136
4.1 Составы штабелей железорудного сырья в исследуемые периоды работы агломашин.....	136
4.2 Показатели работы агломашин.....	141
4.3 Качество агломерата в исследуемые периоды.....	144
Выводы по главе 4.....	146
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	147
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	149
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	151
ПРИЛОЖЕНИЕ А	170

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы

Согласно Стратегии развития металлургической промышленности РФ на период до 2030 г., утвержденной Распоряжением Правительства РФ от 28 декабря 2022 г. № 4260-р, необходимо обеспечить сырьевую безопасность металлургической отрасли страны [1].

Металлургия является одной из ведущих отраслей российской экономики, внося вклад до 5 процентов во внутренний валовый продукт страны. Российская Федерация по итогам 2022 г. занимает четвертое место в мире по производству чугуна, которое составляет 51,6 млн тонн в год. Более чем на 60 % железорудная часть доменной шихты отечественных металлургических предприятий состоит из агломерата, производимого в количестве 56,7 млн. тонн в год [2]. Качество агломерата оказывает большое влияние на технико-экономические показатели работы доменных печей. Основными требованиями к нему являются: повышенное содержание железа, низкое содержание фракции 0-5 мм, высокие холодная и горячая прочность, восстановимость, низкие температуры начала и конца размягчения и узкий температурный интервал размягчения, малые отклонения параметров, характеризующих свойства, от заданных величин, особенно по основности CaO/SiO_2 , содержаниям железа и FeO .

По мере истощения разрабатываемых месторождений железных руд резервы отечественной железорудной базы пополняются за счет ввода новых месторождений или новых их локальных участков, зачастую имеющих низкое качество. Так, на Урале АО «ЕВРАЗ КГОК» в дополнение к разрабатываемому Гусевогорскому месторождению титаномагнетитов в ноябре 2020 г. начало освоение близлежащего Собственно-Качканарского месторождения. На Дальнем Востоке компания ООО «АйЭрСи Групп» (IRC Ltd) в первом квартале 2024 г. планирует начать добычу на Сутарском месторождении железистых кварцитов (32,7 % Fe) в дополнение к разрабатываемому фирмой с 2017 г. Кимканскому месторождению (34,2 % Fe). Подлежат постепенному освоению и другие перспективные месторождения Дальнего Востока, Сибири и Урала [3]. Кроме того,

начиная с 2022 г. российские металлургические предприятия испытывают беспрецедентное по масштабам внешнее санкционное давление, сказывающееся на поставках железорудного сырья. В частности, в первом квартале 2022 г. из-за разрыва торговых связей между ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ПАО «ММК») и его основным поставщиком железорудного сырья Соколовско-Сарбайским горно-производственным объединением (ССГПО), Казахстан, резко изменились шихтовые условия агломерационных фабрик комбината.

Таким образом, для адаптации отечественных аглофабрик к вынужденным изменениям сырьевых условий возникла потребность в разработке рациональной рудной базы.

Степень разработанности темы исследования

Проведенный литературный обзор современных решений по повышению качества агломерата и технико-экономических показателей агломерационного процесса показал целесообразность разработки научно-обоснованного состава шихты для обеспечения высоких уровней производительности агломерационных машин и показателей качества агломерата. Для этого необходимо дополнительное изучение металлургических характеристик агломерата и параметров агломерационного процесса в зависимости от шихтового состава с выявлением математических выражений для научно обоснованного прогнозирования данных величин.

Объект исследования – железорудные концентраты, агломерационные руды, агломерационная шихта, окомковывающие добавки в агломерационную шихту, агломерат.

Предмет исследования – технология производства агломерата.

Цель работы – повышение производительности агломерационных машин и качества агломерата за счет разработки научно обоснованных рациональных составов шихт применительно к современным условиям работы агломерационных фабрик.

Задачи

- разработать и обосновать рациональный состав железорудной части шихты для современных условий работы агломерационных фабрик;
- оценить действие связующих добавочных материалов на показатели процесса окомкования, ход агломерационного процесса и показатели качества готового агломерата, в том числе холодную и горячую прочность, усадку агломерата и перепад давления газа в слое после восстановления под статической нагрузкой;
- исследовать показатели агломерационного процесса и качества получаемого агломерата при изменении содержания агломерационных руд и концентратов в составе шихт.

Научная новизна

1. Разработаны математические зависимости в виде уравнений множественной регрессии и тройных диаграмм, позволяющие рассчитывать вещественный состав шихты для получения качественного агломерата и повышения производительности агломерационных машин. Наиболее высокие показатели удельной производительности и прочности на удар в холодном состоянии обеспечивал состав шихты из агломерационных руд Стойленского, Богословского и Михайловского месторождений в соотношении 50/25/25.

2. Научно обосновано применение связующей добавки в агломерационную шихту на основе отходов сероулавливающей установки (СУУ) с предварительным прокаливанием при 160°C для повышения производительности и улучшения качества агломерата. Введение её в количестве 0,2-0,3 % от массы железорудной составляющей шихты взамен части извести обеспечило увеличение выхода годного агломерата на 1,8 % (отн.), содержания класса +5 мм после испытания в холодном состоянии на 2,3 % (отн.) и удельной производительности по годному агломерату на 1,5 %.

3. Выявлены изменения физико-химических свойств агломерата, произведенного с применением отходов СУУ, в условиях восстановления его при 1100 °С под статической нагрузкой 50 кПа до достижения степени восстановления

20-25 %. Усадка слоя и перепад давления газа в нем уменьшились соответственно на 14,3 и 11,2 % (отн.), по сравнению с параметрами агломерата из базовой шихты.

Практическая ценность и реализация результатов

Применительно к агломерационной фабрике №5 ПАО «ММК» внедрена разработанная рациональная смесь шихтовых материалов, включающая рациональные соотношения железорудных концентратов различных производителей и аглоруд различных месторождений. Изменения внесены в технологическую инструкцию ТИ 101-ГОП-7-2023. Использование рациональной шихты обеспечило увеличение производительности агломерационных машин на 0,27 % от уровня периода их работы на концентрате ССГПО.

Методология и методы исследования

Физическое моделирование агломерационного процесса проведено в лабораторной чаше вместимостью 2,2 кг по загружаемой сухой шихте. Прочностные характеристики получаемого агломерата оценивали испытаниями в трубе, аналогичными испытаниям по ГОСТ 15137-77.

Для испытаний металлургических характеристик железорудного сырья при нагреве под статической нагрузкой в восстановительной среде использован автоматизированный комплекс производства фирмы LECO, Италия, (лаборатория каф. МиХТ МГТУ им. Г.И. Носова).

Химический состав исходных шихтовых компонентов и полученного агломерата определен на рентгеновском энергодисперсионном спектрометре ARL QUANT'X компании Thermo Scientific (Лаборатория спектральных методов анализа кафедры Metallургии и химических технологий «МГТУ им Г.И. Носова», Магнитогорск).

Для идентификации фазового состава окомковывающих добавок в аглошихту были проведены исследования методами рентгеноструктурного анализа на приборе «SHIMADZU XRD-7000» и термического анализа на синхронном термоаналитическом приборе STA (Jupiter 449 F3) фирмы NETZSCH (лаборатория каф. ЛП и М МГТУ им. Г.И. Носова).

Для подтверждения результатов определения содержания общего железа для части проб руд, концентратов и агломератов проведен анализ химическим методом по ГОСТ 32517.1-2013 (ISO 2597-1:2005). Железо двухвалентное определено титрованием, по ГОСТ Р 53657-2009.

Проведен промышленный эксперимент на агломашинах №1 и №2 модели АКМ-312, имеющих площадь спекания 300 м² каждая, аглофабрики №5 ПАО «ММК», который включал следующие этапы: изучение объекта исследования; разработка, научное и технологическое обоснование рационального шихтового состава; проведение опытных промышленных спеканий с выявленной рациональной шихтой; внедрение результатов исследований в производство с соответствующей корректировкой технологической инструкции.

Полученные данные обработаны математически с использованием программных пакетов MathCad, MatLab, Statistica, Microsoft Excel.

Положения, выносимые на защиту:

На защиту выносятся следующие новые научные результаты:

1. Математические зависимости в виде уравнений множественной регрессии и тройных диаграмм, характеризующие изменение основных показателей агломерационного процесса и качества агломерата от вещественного состава шихты, включающей смеси концентратов (Михайловского стандартного и флотационного, Лебединского и ССГПО) и аглоруд (Михайловской, Богословской и Стойленской) и полученные результаты по рациональному составу агломерационных шихт.

2. Научно обоснованные режимы подготовки и применения новых окомковывающих добавок в агломерационную шихту для повышения показателей процесса и качества агломерата.

3. Изменение физико-химических свойств агломерата, произведенного из шихты, включающей рациональное количество предварительно прокаленных отходов СУУ, при восстановлении его под статической нагрузкой при температуре процесса 1100 °С.

Достоверность полученных результатов

Подтверждается использованием ГОСТ 15137-77 при исследовании прочностных характеристик агломерата, ГОСТ 32517.1-2013 (ISO 2597-1:2005) и ГОСТ Р 53657-2009 при химическом анализе проб железорудного сырья, применением автоматизированного комплекса физико-химических исследований фирмы LECO, современных идентификаторов фазового состава, результатами промышленного эксперимента на агломашинах фабрики №5 ПАО «ММК», обработкой данных с использованием современных математических программных пакетов.

Личный вклад автора

Все результаты, приведенные в диссертации, получены самим автором и при его непосредственном участии. Вклад автора заключается в формулировании цели и задач исследования, организации и проведении лабораторных и промышленных экспериментов, анализе и интерпретации результатов исследования, разработке математических зависимостей основных показателей аглопроцесса и качества агломерата от состава железорудной части шихты, формулировке основных положений и выводов.

Апробация работы

Основные положения работы доложены и обсуждены на следующих конференциях: XVIII Международной конференции «Современные проблемы электрометаллургии стали», Россия, Первоуральск, 2019 г., XVI и XVII Международных конгрессах сталеплавильщиков и производителей металла (ISCON-2021, Россия, Екатеринбург, 2021 г. и ISCON-2023, Магнитогорск, 2023 г.), 78-й, 79-й, 80-й и 81-й международных научно-технических конференциях «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» (Магнитогорск, 2020, 2021, 2022, 2023 гг.), I и II Национальной научно-практической конференции «Технологии металлургии, машиностроения и материалобработки» (Россия, Магнитогорск, 2020 г. и 2022 г.), международной научно-технической конференции Пром-Инжиниринг 2022 (ICIE-2022, Россия, Сочи, 16-20 мая 2022 г.), международных конференциях 15th and 16th International

Conference on Industrial Manufacturing and Metallurgy, ICIMM 2020 and 2021 (Нижний Тагил, 18–19 июня 2020 года и 17–19 июня 2021 года).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 16 научных трудов, из них 3 статьи – в рецензируемых журналах из перечня изданий, рекомендованных ВАК РФ, и 3 статьи – в журналах, индексируемых в международных базах Web of Science, Scopus.

Соответствие диссертации научной специальности. Диссертация соответствует паспорту научной специальности 2.6.2. «Металлургия черных, цветных и редких металлов», п. 15 «Подготовка сырьевых материалов к металлургическим процессам и металлургические свойства сырья» и п. 17 «Пирометаллургические процессы и агрегаты».

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографического списка из 153 наименований и 1 приложения. Она изложена на 171 страницах печатного текста, содержит 10 рисунков и 46 таблиц.

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ПОСТАНОВКА ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ

1.1. Обзор месторождений железных руд Российской Федерации

1.1.1. Разрабатываемые месторождения

Российская сырьевая база является третьей по величине в мире, уступая лишь Бразилии и Австралии. В соответствии со Стратегией развития минерально-сырьевой базы до 2035 года, утвержденной распоряжением Правительства РФ от 22.12.2018 № 2914-р, железные руды относят к первой группе полезных ископаемых, запасы которых при любых сценариях развития экономики достаточны для удовлетворения внутренних поставок с обеспечением экспорта железорудного сырья в долгосрочной перспективе. Однако неравномерность обеспеченности железными рудами приводит к возникновению локальных дефицитов. Наиболее остро дефицит качественного местного железорудного сырья сказывается на металлургических предприятиях Урала и юга Западной Сибири; существует угроза возникновения его также на Северо-Западе, вследствие быстрого исчерпания запасов. Результатом является увеличение стоимости логистики поставок, что сказывается на себестоимости металлопродукции [4].

Балансовые запасы железных руд учитываются в 230 месторождениях на территории 26 субъектов Российской Федерации и по состоянию на 01.01.2022 г. составляют 112,1 млрд т. Основная часть запасов сосредоточена в месторождениях железистых кварцитов; имеются также крупные запасы титаномагнетитовых и скарново-магнетитовых железных руд. Среднее содержание железа составляет от 16 до 40%, что обуславливает необходимость предварительного обогащения, осуществляемого методами магнитно-гравитационной, магнитно-гравитационно-флотационной и магнитно-флотационной сепарации. Получаемые концентраты содержат в среднем от 62 до 67% железа. Современная тенденция развития железорудной базы страны состоит в получении концентратов с более высоким содержанием железа (69-71%), в основном за счет внедрения оборудования тонкого грохочения [5].

За период с 2011 по 2021 г. добыча железных руд в России выросла на 9,3%, в основном за счет развития добычи в Еврейской АО (начало эксплуатации

Кимканского месторождения), Забайкальском крае (начало отработки Быстринского скарново-магнетитового месторождения). В 2021 г. было введено в эксплуатацию также Собственно-Качканарское месторождение Свердловской области. В 2022 г. добыча железных руд в Российской Федерации составила 295,1 млн т. Производство железорудного концентрата при этом составило 94,8 млн т, производство окатышей – 47,8 млн т [6].

Основой железорудной базы России (63% от запасов) является Курская магнитная аномалия (Центральный ФО, территория Белгородской, Курской, Орловской областей). Крупнейшим разрабатываемыми месторождениями являются: Михайловское (Курская область), Лебединское и Стойленское (Белгородская область). Содержание железа в рудах составляет от 33 до 40%, однако руды легкообогатимы и доступны для добычи открытым способом. Здесь же имеются более богатые разности кор выветривания (Гостищевское и Яковлевское месторождения Белгородской области), содержащие от 60 до 61% железа, однако их добыча осложняется ухудшенными горно- и гидротехническими условиями. Все металлургические предприятия Центра традиционно не испытывают проблем с поставками железорудного сырья [7].

Около 18% добычи обеспечивают объекты Северо-Западного ФО: Костомукшское месторождение (Республика Карелия, железистые кварциты), Ковдорское месторождение (Мурманская область, бадделеит-апатитово-магнетитовые руды), а также более мелкие Оленегорское, Кировогорское и др месторождения. В основном производимые здесь концентраты и окатыши потребляются на местных мощностях металлургического комплекса, основой которого является Череповецкий металлургический комбинат (ПАО «Северсталь») [8].

На Урале осуществляется в основном добыча титаномагнетитов, которые, несмотря на значительные запасы (доля запасов Уральского ФО составляет 15,1% от общих запасов РФ), характеризуются низким содержанием железа (менее 16,6%) и повышенным содержанием оксида титана (на уровне 2%). Промышленная ценность руд этого типа растет за счет значительного содержания оксида ванадия

(0,5-1,5%), представляющего собой стратегически ценный товарный продукт. Крупнейшими разрабатываемыми месторождениями титаномагнетитов в данном регионе являются гигантские Гусевогорское и Собственно-Качканарское месторождения. Кроме титаномагнетитов имеются также средние и мелкие месторождения и группы месторождений скарново-магнетитового типа (Высогорская и Гороблагодатская группы месторождений Свердловской области), а также месторождения гетит-гидрогетитовых оолитовых осадочных руд и кор их выветривания Бакальской группы Челябинской области. Содержание железа в этих рудах составляет от 25 до 52%, руды легкообогатимы. Крупнейшие металлургические предприятия региона – Нижнетагильский металлургический комбинат (ООО «Евраз») и Магнитогорский металлургический комбинат (ПАО «ММК») находятся в разных условиях по обеспеченностью железорудным сырьем. Нижнетагильский МК имеет мощную собственную железорудную базу (продукция Качканарского ГОК, осуществляющего добычу на месторождениях Гусевогорской группы), а Магнитогорский МК до 2022 г. импортировал около 70% от используемого железорудного сырья из Казахстана (ССГПО), однако с апреля 2022 г. поставки на предприятие прекратились из-за разрыва торговых отношений с казахстанской стороной, обусловленного санкционной политикой. В результате изменения структуры поставок предприятие перестроилось на потребление железорудного сырья, экспортируемого с Центра и Севера РФ. Проблемы с железорудной базой имеются также у Челябинского МК [9,4]. Частичным решением проблемы является пирометаллургическая переработка уральских комплексных руд [10].

В Западной Сибири основным потребителем железорудного сырья является Западно-Сибирский металлургический комбинат, который обеспечивается в основном за счет местных Шерегешевского и Таштагольского месторождений руд скарново-магнетитового типа (36-45% железа), эксплуатацию которых осуществляет АО «ЕВРАЗ ЗСМК» (Evraz Group) [4,8].

Почти 60% запасов Дальневосточного ФО приходится на месторождения железистых кварцитов (Тарыннахское, Горкитское, Сутарское, Кимканское,

Костеньгинское месторождения), скарново-магнетитовых руд (Десовское, Таежное, Бытринское, Гаринское и др. месторождения). Руды легкообогатимы и содержат от 26 до 49% железа. Продукция в данном регионе в основном ориентирована на экспорт на рынки Азиатско-Тихоокеанского региона [11].

1.1.2. Перспективные месторождения

Развитие железорудной базы Российской Федерации осуществляется за счет ввода в эксплуатацию новых месторождений и новых участков эксплуатируемых месторождений.

Общество с ограниченной ответственностью "КМА-руда" запланировало на ближайшие годы комплексное развитие главного сырьевого актива - залежей железорудных кварцитов разрабатываемого подземным способом Коробковского месторождения. Инвестиционная программа предусматривает вложение 58,2 млрд. рублей и создание 2,3 тыс. рабочих мест. Так, к 2028 году планируется нарастить объемы добычи руды с 4,8 до 12 млн. тонн в год и увеличить производство концентрата до 3,5 млн. тонн в год, окатышей - до 2 млн. тонн в год. При этом основным потребителем предприятия остается ПАО «Тулачермет» [1].

Формально подготавливаемым к эксплуатации в РФ считается месторождение Суроямское (Челябинская область, титаномагнетиты с содержанием железа в среднем 14,3%). Оно является территориально доступным для ПАО «ММК», однако из-за недостатка инвестиций перспективы реального освоения месторождения до сих пор остаются неопределенными; кроме того, доменный цех ПАО «ММК» не готов в настоящее время к ведению плавки с высокой долей титаномагнетитового сырья [12].

Дальневосточное Сутарское месторождение (железистые кварциты с содержанием железа на уровне 32,7%) планируется ввести в эксплуатацию в начале 2024 г. Железорудное сырье, которое будет производить владелец лицензии на разработку месторождения ООО «АйЭрСи Групп» (IRC Ltd), в основном будет ориентировано на экспорт [13].

К подготавливаемым к эксплуатации в настоящее время относят также следующие месторождения железных руд Российской Федерации: Печегубское (ПАО «Северсталь»), Таежное и Десовское (ЗАО «ГМК «Тимир»), Пионерское и Сиваглинское (АО «ХК «Якутуголь»), Большой Сэим и Гаринское (IRC Limited),

Аятское (ООО «Железные руды Урала») и Чинейское (ОАО «ГМП «Забайкалстальинвест») [4]. Ряд инвестпроектов разработки разведанных месторождений получил неофициальный статус «долгостроев» (Суроямское, Чинейское и др.) ввиду, с одной стороны, наличия неоспоримых перспектив разработки месторождений, а с другой – отсутствия на протяжении долгого времени фактического продвижения в реализации проектов.

1.2. Metallургические характеристики агломерата и возможности их повышения

1.2.1. Прочностные свойства

Совершенствование прочностных характеристик агломерата является предметом активных научных исследований на протяжении более чем 100 лет существования этого способа окускования железорудного сырья. Большой вклад в изучение вопросов совершенствования технологии агломерации и прочности агломерата внесли работы С.В. Базилевича, Е.Ф. Вегмана, В.А. Шурхала, В.И. Коротича, Г.В. Коршикова, Т.Я. Малышевой, Ю.С. Юсфина, В.А. Уткова, Ю.А. Фролова, С.К. Сибатуллина, В.Г. Дружкова, А.Г. Неясова [14-26]. Вопрос влияния структурообразования с участием жидких фаз на этапе окомкования аглошихты на прочностные свойства агломерата изучен в работах [27-29]. Развитие твердофазных реакций изучено в работе [30].

Технико-экономические показатели доменной плавки в значительной мере определяются качеством загружаемых шихтовых материалов [31-33], распределением их по окружности и радиусу колошника [35-41]. Современное доменное производство предъявляет высокие требования к качеству железорудных материалов; требования к металлургическим характеристикам агломерата для доменной плавки и методы их оценки изложены в ряде работ [42-47]; основные из этих требований приведены в табл. 1.1 [48,49].

Таблица 1.1

Современные требования к металлургическим характеристикам агломерата для доменной плавки (по разработкам Уралмеханобра* / ИЧМ**) [48,49]

Показатель	Величина показателя
«Холодная» прочность, по содержанию фракций агломерата, %, после испытания по ГОСТ 15137-77 [32]: - сопротивление удару (+5 мм) - истираемость (-0,5 мм)	не менее 80 не более 4*/5**
Содержание мелочи в отгружаемом агломерате (0-5 мм), %	6* / 10**
Крупность отгружаемого агломерата, по содержанию фракции 8-35 мм, %	не менее 85
Прочность в процессе восстановления, по содержанию фракций агломерата, %, после испытания по ГОСТ 19575-74* / 19575-81** [51]: - прочность при восстановлении (+10 мм) - истираемость (-0,5 мм)	не менее 50 не более 5
Усадка слоя при восстановлении под нагрузкой по ГОСТ 21707-76 [52], %	не более 20*
Перепад давления газа-восстановителя в слое, Па (ГОСТ 21707-76* / 73**)	не более 150* / 147**
Испытание восстановимости агломерата по ГОСТ 17212-84 [53]: - фактическая степень восстановления, % - восстановимость при степени восстановления 40%, %/мин	не менее 90* не менее 0,5*
Температура начала размягчения, °С	не ниже 1050*
Температура конца размягчения, °С	не ниже 1150*
Температурный интервал размягчения, °С	не более 100*
Температура потери газопроницаемости слоя, °С	1260-1280**
Температура начала фильтрации жидких фаз, °С	не ниже 1380**
Температура максимальной фильтрации, °С	1500-1560**
Допустимое содержание щелочей в агломерате, %	не более 0,15**
Допустимые колебания химического состава агломерата: - содержание железа, % - содержание FeO, % - основность по CaO/SiO ₂ , доли ед.	± 0,25 ± 1,00 ± 0,05
Содержание закиси железа в первичном шлаке, %	не более 12**
Остаток шлака в слое кокса при 1600 °С, %	не более 18**

Содержание мелочи в агломерате оказывает большое влияние на технико-экономические показатели доменной плавки. Так, отделение от агломерата всей мелочи фракции 0-10 мм позволило повысить производство на 16,4% и сократить расход кокса на 6,5% [54]. Уменьшение на 1% количества фракции 0-5 мм в агломерате, загружаемом в доменную печь, приводило к росту производительности печи на 0,86-1,5% и снижению расхода кокса на 1,5-1,67% [55]. Гранулометрический состав, углы откоса загружаемых материалов, их насыпная плотность влияют на распределение компонентов доменной шихты по радиусу и окружности колошника [24,56-59]. Поэтому достоверная информация о данных показателях позволяет эффективно управлять режимами загрузки доменной печи [60,58,61-64]. Систематическое исследование влияния агломерата с повышенным содержанием мелкой фракции 0-5 мм на показатели доменной плавки и разработка рациональных режимов загрузки такого агломерата для условий доменного цеха ПАО «ММК» проведена в диссертации [65]. В рамках работы подробно проанализировано влияние физико-механических свойств некондиционного агломерата на технико-экономические показатели доменной плавки при загрузке его индивидуально и в смеси с другими компонентами доменной шихты, однако анализ изменения физико-химических характеристик агломерата при восстановлении не был проведен.

Пористость материалов имеет значение для хода процессов тепло- и массообмена, в том числе для восстановления железа и других элементов из оксидов [66-70]. Информация о порозности агломерата используется при описании движения газов по межкусковым пустотам [71-73]. Определения насыпной, средней и истинной плотности агломерата производятся в соответствии с ГОСТ 25732-88 [74]. Открытую пористость агломерата обычно определяют в соответствии с ГОСТ 2409-95 [75] насыщением его водой под вакуумом. Общую пористость вычисляют по результатам определения средней и истинной плотности в соответствии с ГОСТ 25732-88.

Порозность агломерата считают по насыпной ($\rho_{\text{нас}}$) и средней ($\rho_{\text{ср}}$) плотностям (1.1):

$$\varepsilon = 1 - \rho_{\text{нас}} / \rho_{\text{ср}} \quad (1.1)$$

Согласно результатам [76], агломерат аглофабрики №5 ПАО «ММК», по сравнению с агломератом фабрик №2, №3 и №4, имеет следующие отличия:

- пониженная средняя плотность, равная 3,20 г/см³, против средней плотности агломерата фабрик №№ 2, 3 и 4, величина которой находится на уровне 3,27-3,30 г/см³;

- увеличенная на 2,9% истинная плотность

- меньший на 34,6% внутренний угол откоса и на 28,4% наружный угол откоса;

- наиболее высокая порозность - на фабриках №№ 2, 3, 4 и 5 её величина оставляет соответственно 0,47, 0,47, 0,46 и 0,50 м³/м³;

- увеличенная на 1,5% абс. восстановимостью в среде водорода при температуре 500 °С, по сравнению с агломератом фабрик № 2, 3 и 4;

- высокие прочностные характеристики в холодном состоянии: $СУ_{+5} = 92,00\%$; $Р_{0,5-5} = 5,50\%$; $И_{0,5} = 2,50\%$ и относительно низкие характеристики прочности после низкотемпературного восстановления в среде водорода: $СУ_{+5} = 29,80\%$; $Р_{0,5-5} = 57,58\%$; $И_{0,5} = 12,63\%$, обусловленные высокой восстановимостью материала.

Использование в составе шихты агломерата повышенного качества, произведенного на современных агломерационных фабриках с низким содержанием мелкой фракции, высоким содержанием железа, обладающего высокой холодной и горячей прочностью, позволяет уменьшать взаимное сопротивление потоков шихты и газа в верхней части печи [77-80], уменьшает вынос колошниковой пыли [31,46]. В результате создаются условия для интенсификации процесса выплавки чугуна в доменной печи [81-85].

В группе характеристик агломерата, относящихся к химическому составу [86], наиболее важными по влиянию на прочность являются: содержание общего железа

в агломерате, основность по CaO/SiO_2 , а также содержание FeO . Содержание железа в отечественных агломератах колеблется в основном в интервале от 44% до 58%, в то время как за рубежом, в передовых странах с развитой металлургией (Япония, Германия) используют агломерат с более высоким средним содержанием железа, в диапазоне от 55% до 59%. Содержание FeO в отечественных агломератах изменяется в диапазоне от 7% до 21%, при этом чаще находится в диапазоне от 10% до 15%, а на передовых японских и германских доменных производствах используют агломерат с меньшим содержанием FeO , в диапазоне от 4% до 7%.

Основность агломерата изменяется в диапазоне от 0,1 до 4,5 и даже выше и задается, как правило, потребностями доменного производства. Основность определяет характер минеральной связки в агломерате и оказывает поэтому большое влияние на прочность агломерата [45,87,88]. Известен «провал» прочностных характеристик агломерата в диапазоне основностей от 1,2 до 1,5, объясняемый рядом исследователей как следствие формирования в этом диапазоне основностей фазы двухкальциевого силиката, испытывающей при охлаждении полиморфное превращение с увеличением объема до 10%, вызывающее растрескивание. Так, в экспериментах Тарасова и коллег [89] показатель барабанной пробы X_{+5} падал с 62,3% в среднем для агломератов основностью 1,0-1,2 до 53,1% в среднем для агломератов основностью в диапазоне от 1,2 до 1,5, после чего вновь возрастал до 81,5% в среднем для агломерата с основностью в диапазоне от 1,5 до 8,0. В шихтовых условиях ПАО «ММК» [90] при увеличении основности на 0,1 в диапазоне от 1,68 до 2,01 содержание мелочи фракции 0-5 мм в готовом агломерате сокращалось на 0,047% (абс.), рост показателя сопротивления удару по ГОСТ 15137-77 возрастал на 0,89% (абс.) при сокращении истирания на 0,149% (абс.).

Один из возможных механизмов упрочнения офлюсованного агломерата связан с присутствием в минеральной связке алюмосиликоферритов кальция (SFCA фазы, рис. 1.1). Количество этой фазы при заданном количестве оксидов алюминия и магния растет с увеличением основности по CaO/SiO_2 (рис. 1.1 [91]) и способствует повышению «холодной» и «горячей» прочности агломерата. При

этом на выход годного агломерата из спека и удельную производительность агломерационной машины увеличение основности и наличие SFCA фазы влияют слабо (рис. 1.2 [91]).

Поскольку высокая основность агломерата положительно отражается на прочности, высокоосновный агломерат подлежал подробному изучению отечественными [92] и зарубежными [93] учеными-металлургами. Однако, несмотря на преимущества высокоосновного агломерата, на большинстве агломерационных фабрик производят агломерат средней основности, обычно лежащей в диапазоне от 1,0 ед. до 2,0 ед.

При небольших содержаниях оксида магния в агломерате (обычно не более 2,0-2,5%; эта цифра дополнительно уточняется, исходя из содержания MgO в доменном шлаке на уровне 8-12%) концентрация этого оксида благотворно сказывается на прочности агломерата. Так, в работах [94,95] показано, что при увеличении содержания оксида магния в агломерате с 1,11 % до 1,57 % при постоянной основности по $\text{CaO/SiO}_2 = 1,6$ ед. происходил рост сопротивления годного агломерата удару по содержанию класса +5 мм после испытания в барабане по ГОСТ 15137-77 с 71,2% до 75,0% (на 5,3% отн.) и снижение истираемости агломерата по содержанию класса -0,5 мм после испытания в барабане по ГОСТ 15137-77 с 5,5% до 4,4% (на 20,0% отн.). С точки зрения минералогии агломерата, авторами исследования [96] отмечается сокращение количеств фаз гематита и кальциевых ферритов с одновременным ростом количества магнетита при увеличении основности по $(\text{CaO} + \text{MgO}) / (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$ с 0,7 ед. до 1,9 ед. В целом оксид магния способствовал образованию стекла и препятствовал появлению двухкальциевого силиката в пользу Ca-Fe-Mg оливинов и пироксенов.

Повышенное содержание титана в агломерате приводит к восстановлению его в ходе доменной плавки из оксида в тугоплавкие карбиды, нерастворимые в шлаке и ограниченно растворимые в чугуне, вместе с которыми могут образовываться также карбонитриды и оксикарбонитриды, имеющие схожие свойства [97].

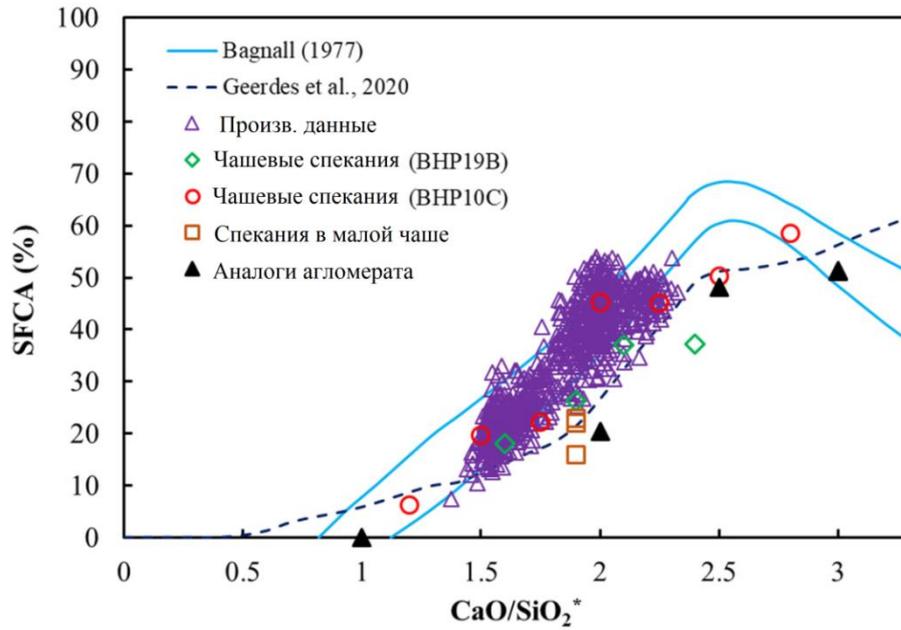


Рисунок 1.1 – Влияние основности агломерата на содержание фазы алюмосиликоферритов кальция (SFCA) в составе минеральной связки, по данным производственных и лабораторных спеканий [91]

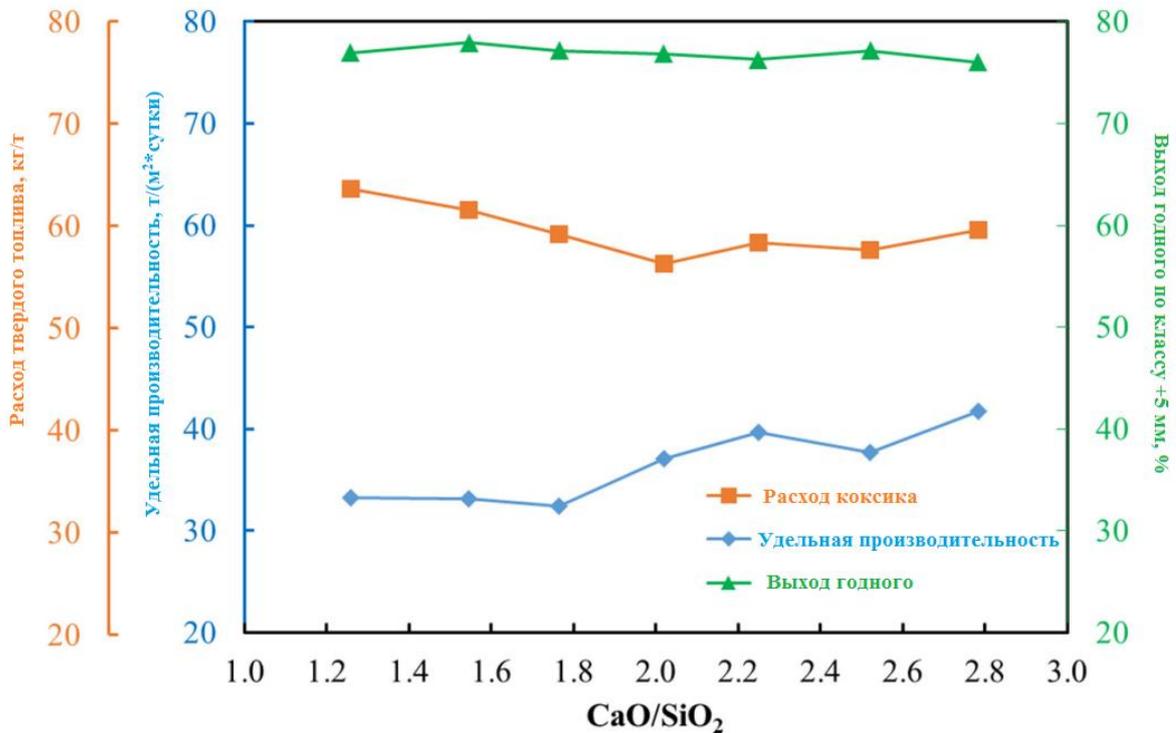


Рисунок 1.2 – Влияние основности агломерата на основные технико-экономические показатели агломерационного процесса [91]

В результате резко снижается вязкость шлаков, происходит загромождение горна тугоплавкими массами [98]. Поэтому плавка агломерата, полученного из титаномагнетитовых концентратов [99-101], имеет свою специфику и реализуется в отечественной металлургии преимущественно при содержаниях TiO_2 в доменном шлаке до 10-15%, за рубежом – до 20-25% [102], хотя в работе [9] указывается, что теоретически возможна доменная плавка титаномагнетитов при содержании диоксида титана в шлаке до 40%. Работа с титанистым агломератом, в том числе для выделения оксида титана [103] или легирования выплавляемой стали ванадием, содержащимся в титаномагнетитовых рудах в виде природного легирующего элемента [104], сопряжена со значительными трудностями.

Показатели горячей прочности агломерата [105] имеют решающее значение для доменного процесса. В исследовании [106] отмечалось, что наибольшее разупрочнение железорудных материалов в лабораторных экспериментах происходило в условиях повышенного количества кокса, поэтому при работе печи с верхней определяющей зоной по силовому взаимодействию между потоками газа и шихты разработка рационального режима предполагала размещение в зоне рудного гребня материалов с наименьшими показателями горячей прочности. Так, увеличение доли агломерата в рудных скипах, содержащее которых поступало в кольцевую зону колошникового пространства доменной печи №2 ПАО «ММК», соответствующее $2/3$ - $3/4$ радиуса колошника от его центра, при неизменной доле окатышей в 40%, от 45% в базовом периоде (период I) до 60% (период II) и 70% (период III) привело к снижению коэффициента сопротивления шихты движению газов на колошнике с 1,99 (период I) до 1,72 (период II) и 1,54 (период III), то есть в среднем на 9,0% (отн.) на каждые 10% увеличения доли агломерата, размещенного на расстоянии от $2/3$ до $3/4$ радиуса колошника от его центра. В обоих опытных периодах заметно возросла интенсивность хода печи по дутью при одновременном сокращении выноса колошниковой пыли. В результате произошло следующее изменение технико-экономических показателей плавки: приведенный к условиям базового периода расход кокса сократился с 469,8 кг/т чугуна (период I) до 468,4 кг/т чугуна (период II) и 465,2 кг/т чугуна (период III), то есть в среднем

на 0,29% (отн.); приведенная производительность печи возросла с 3633 кг/т чугуна (период I) до 3635 кг/т чугуна (период II) и 3641 кг/т чугуна (период III), то есть в среднем на 0,05%, на каждые 10% увеличения доли агломерата, размещенного на расстоянии от $\frac{2}{3}$ до $\frac{3}{4}$ радиуса колошника от его центра.

1.2.2. Физико-химические свойства

Наиболее важными физико-химическими характеристиками агломерата, определяющими его поведение в доменной печи, являются: температуры начала и конца размягчения и плавления, ширина температурного интервала размягчения-плавления (ТИРП), горячая прочность и восстановимость агломерата.

Агломерат как один из основных видов подготовленного железорудного сырья для доменной плавки имеет ряд преимуществ и недостатков. Положительные металлургические характеристики агломерата включают: технологическую возможность получения из любых железосодержащих материалов и отходов металлургического производства, офлюсовывания до любой требуемой основности по CaO/SiO_2 , угол естественного откоса, близкий к углу откоса доменного кокса, низкие значения усадки слоя, перепада давления газа в слое [107,108], а также узкий интервал между температурами начала и конца плавления при высокотемпературном (выше 1100 °С) восстановлении, если основность агломерата выше 1,2. Сравнительная характеристика температур начала и конца плавления агломерата и окатышей разного происхождения приведена в табл. 1.2. [109]. Как видно из таблицы, агломерат ПАО «ММК» демонстрирует благоприятные для проведения доменного процесса температурные свойства: он размягчается лишь при достижении температуры в 1219 °С и полностью расплавляется уже при 1390 °С, так что температурный интервал плавления оказывается довольно узким и составляет лишь 171 °С.

Температурные характеристики плавления различных железорудных материалов для доменной плавки [109]

Температурные характеристики плавления	Агломерат ММК	Окатыши ССГПО	Окатыши Михайловского ГОК	Окатыши Лебединского ГОК
Температура размягчения, °С	1219	1088	1093	1095
Температура расплавления, °С	1390	1488	1452	1458
Температурный интервал плавления, °С	171	400	359	363

В то же время представленные в таблице разновидности окатышей начинают плавиться при относительно низких температурах, их размягчение начинается уже при 1088-1095 °С, но начавшееся рано плавление не завершается вплоть до относительно высоких температур, составляющих от 1452-1485 °С (Михайловские и Лебединские окатыши) и вплоть до 1488 °С (окатыши ССГПО). Температурные интервалы плавления окатышей, таким образом, оказываются более чем в два раза шире, по сравнению с агломератом ММК, и находятся в диапазоне от 359-363 °С (Михайловские и Лебединские окатыши) и вплоть до 400 °С (окатыши ССГПО). Такие широкие интервалы начала и конца плавления окатышей способствуют увеличению высоты зоны вязкопластичных масс и ухудшению газопроницаемости шихты в нижней части печи.

На ширину температурного интервала размягчения-плавления (ТИРП) оказывает значительное влияние основность, так, в опытах [110] с офлюсованным агломератом на основе концентрата Стойленского ГОКа, основность которого изменяли в диапазоне от 1,2 до 2,0 с шагом 0,2, было установлено, что наиболее широкий ТИРП соответствовал агломерату основностью 1,2, а самый узкий ТИРП – агломерату основностью 2,0.

Важной металлургической характеристикой агломерата является также восстановимость [111,112]. Восстановимость характеризует способность

материала отдавать кислород из оксидов железа в твердой фазе [113] и определяет соотношение между процессами прямого и косвенного восстановления в доменной печи, причем высокая восстановимость соответствует более полному использованию химической энергии восстановительных газов в верхней части печи и, как следствие, снижению расхода кокса. Так, согласно данным [114] при работе печей на одном агломерате снижение восстановимости на 1% (абс.) приводит к повышению расхода кокса на 4 кг/т чугуна. Для оценки восстановимости железорудных материалов применяют отечественные (ГОСТ 17212-84, 28658-90, 28657-90) и международные (ИСО 7215-85, 4895-84) [115,116] стандарты на методы испытаний.

Недостатками агломерата с точки зрения использования его в доменной плавке являются: относительно низкое содержание железа, повышенное содержание мелочи (класса 0-5 мм) в готовой продукции, широкий диапазон крупности дробленого агломерата, низкая прочность и высокая истираемость при транспортировке и перегрузках, низкая прочность и высокая истираемость в процессе низкотемпературного восстановления, относительно низкая восстановимость [117].

1.2.3. Современные технологии обеспечения и повышения качества агломерата

Исследователями предлагается ряд технологий [118] для повышения качества агломерата, и многие из них получили распространение на современных действующих и строящихся агломерационных фабриках.

Так, двухслойное или многослойное спекание с размещением в верхней части слоя с более низкой основностью или с повышенным содержанием коксика, в сравнении с нижним слоем, позволяет повысить прочностные характеристики получаемого агломерата [119]. Современные аглофабрики активно используют спекание в высоком слое (500-700 мм), которое позволяет снизить долю агломерата верхних слоев, получающего сниженное количество тепла при агломерации, в сравнении с нижними слоями [120], стабилизацию агломерата за счет

механической обработки [54]. Предлагается также использовать комбинированный нагрев аглошихты [17], термообработку (отжиг) агломерата [121,122], нагревание и обогащение просасываемого при агломерации воздуха кислородом [123,124], размещение твердого топлива различных классов крупности в разных участках слоя агломерационной шихты [125-127], вводить твердое топливо или известь в конце процесса окомкования сырой шихты для создания обогащенной углеродом и/или оксидом кальция оболочки гранулы [128,129], отдельно получать вместо агломерата средней основности (1,2-1,6 по CaO/SiO_2) более прочные низкоосновный и высокоосновный агломераты с последующим объединением их перед загрузкой в доменную печь [130,131], вводить в шихту легкоплавкие добавки (ферритные смеси), хорошо смачивающие шихтовые компоненты [132], а также ряд других технологических приемов [133,134].

На этапе дробления и грохочения агломерата повышение качества агломерата может быть достигнуто использованием способом дробления агломерата в одновалковой зубчатой дробилке ударом [135]. В этом случае на агломерат помимо сжимающей нагрузки со стороны ротора передается также ударная нагрузка со стороны ротора или со стороны колосников, или комбинированно, как со стороны ротора, так и со стороны колосников, при этом ударное воздействие осуществляют поочередно то ротор, то колосники дробилки. В результате достигается улучшение ситового состава измельчаемого агломерата за счет уменьшения содержания нежелательных крупных классов крупности.

При охлаждении агломерата важное значение имеет выбор рациональной тепловой схемы охлаждения [136].

Стоит отметить, что часть предлагаемых исследователями мероприятий не используется на аглофабриках по причине нежелательного усложнения технологического процесса.

Вынужденное изменение шихтовых условий часто отрицательно сказывается на качестве агломерата. Случаи снижения доли концентрата ССГПО на аглофабриках ПАО «ММК» в связи с прекращением поставок время от времени имели место, особенно в кризисные для экономики периоды. Так, в мае 2005 г. была

нарушена освоенная технология производства агломерата при высокой доле концентрата ССГПО и аглоруды Михайловского ГОК. Взамен были использованы концентрат Ковдорского ГОК и аглоруда Бакальского РУ. В результате адаптации технологии с участием специалистов ГОП ПАО «ММК» и «МГТУ им. Г.И. Носова» удалось, однако, не снизить и даже по ряду показателей повысить качество агломерата: снизить стандартное отклонение (СКО) по железу (на 27,4% отн.), содержание мелочи 0-5 мм (на 1,2% (отн.)) при соответствующем повышении средневзвешенной крупности агломерата с 28,72 мм до 29,06 мм, а также снизить СКО содержания всех классов крупности в отсевах агломерата [137]. Использование рациональных шихт позволяет повысить показатели агломерационного процесса при заданном качестве агломерата [138,139]

В июле 2019 г. была введена в строй новая аглофабрика №5 горно-обогатительного производства ПАО «ММК». Общие капитальные вложения в комплекс аглофабрики составили около 30 млрд руб. Стоимость контрактного оборудования достигла 6,7 млрд руб. Проектная мощность аглофабрики, работающей по современным энергосберегающим и экологически безопасным технологиям [140], составляет 5,5 млн тонн высококачественного доменного сырья – охлажденного и стабилизированного по фракционному составу агломерата с содержанием железа 58,0% и долей тонких железорудных концентратов в аглошихте 89,2%. На фабрике имеется закрытый механизированный усреднительный склад железорудного сырья, оснащенный современным штабелеукладчиком и двумя рудозаборными машинами. Перед усреднительным складом имеется автономное дозирочное отделение для железорудного сырья с известью, что является первым случаем применения такого проектного решения на аглофабриках России [141]. После доработок, проведенных с участием ООО «РнД МГТУ», установлено рациональное распределение извести между усреднительным складом и шихтовым отделением в зимний период [142]. Фабрика оснащена двумя агломашинами площадью спекания по 300 м² каждая, спекание агломерата производится в высоком слое, 700 мм, при разрежении в газопроводе агломашин 17 кПа. Под слой аглошихты укладывается постель фракции 10-20 мм высотой 20-

40 мм. Агломашина оснащена системой рециркуляции отходящих газов, позволяющей снизить выбросы CO в окружающую среду [143]. Для снижения вредного воздействия SO₂ аглогазов предусмотрены сероулавливающие установки с обезвоживанием получаемых шламов и получением гипса. Полученный на фабрике агломерат имеет содержание мелочи фракции 0-5 мм не более 5%, а температура на разгрузочном конце охладителя составляет не более 100 °С.

1.3. Пути повышения производительности агломашин

1.3.1. Руды и концентраты. Состав основной части шихты

В работе [144] для оценки факторов, влияющих на удельную производительность агломерационной машины, использован способ анализа размерностей. В результате эффективность агломерационного процесса (удельная производительность агломашин) получила следующее аналитическое выражение:

$$W = \frac{q(h\rho)}{d} \cdot \left(\frac{v}{q}\right)^k, \quad (1.2)$$

где W – удельная производительность агломерационной машины, кг/(м²·с);
 q – газопроницаемость шихты, м³/(с·м²);
 d – эквивалентный диаметр окомкованной шихты, м;
 $(h\rho)$ – комплекс удельной нагрузки, равный произведению высоты слоя шихты h , м, на насыпную массу шихты ρ , кг/м³;
 v – вертикальная скорость спекания, м/с;
 k – коэффициент, вычисляемый по экспериментальным данным.

В данной формуле компонента $\left(\frac{v}{q}\right)^k$ представляет собой критериальный безразмерный комплекс, учитывающий химический и компонентный состав спекаемой шихты и другие факторы, влияющие на газопроницаемость аглошихты и вертикальную скорость спекания. Для одного вида спекаемого материала и при одинаковых условиях ведения агломерационного процесса этот комплекс остается неизменным.

Аналогичным образом получены зависимости удельной производительности агломашины от других параметров процесса:

$$W = \frac{p(h\rho)}{d} \cdot \left(\frac{h\rho}{p\tau^2 d^2} \right)^l, \quad (1.3)$$

$$W = \frac{h\rho}{\tau} \cdot \left(\frac{v}{q} \right)^m, \quad (1.4)$$

где p – общее газодинамическое сопротивление слоя шихты, кг/(м·с²);
 d – эквивалентный диаметр окомкованной шихты, м;
 τ – продолжительность процесса спекания, с;
 $(h\rho)$ – комплекс удельной нагрузки, равный произведению высоты слоя шихты h , м, на насыпную массу шихты ρ , кг/м³;
 τ – продолжительность процесса спекания, с;
 v – вертикальная скорость спекания, м/с;
 l, m – коэффициенты, вычисляемые по экспериментальным данным.

Для условий ОАО «Уральская сталь» авторами были найдены значения постоянных величин уравнений (1.1)-(1.3) при использовании в шихте смеси из Лебединского и Михайловского концентратов: $\left(\frac{v}{q}\right) = 7,66 \cdot 10^{-5}$; $k = 1,62$; $l = 26,74$; $m = 0,072$. Как отмечается в работе, подход позволяет плодотворно связывать и другие параметры агломерационного процесса, за исключением влажности, оказывающей большое влияние на протекание процесса и все его основные показатели.

В работе [145] было отмечено повышение удельной производительности агломерационной машины на 1,95% на аглофабрике ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» в результате использования вместо обычного Абагурского концентрата, для которого не была прежде решена проблема смерзания в зимний период, Абагурского концентрата, профилактированного известью, получаемой обжигом известняка на агломашине КМ-14. В то же время в работе отмечается, что суммарный расход извести в период применения профилактированного

концентрата возрос с 25,86 кг/т до 50,58 кг/т агломерата, при этом сравнение с опытом, проведенным при равном количестве извести, не приводится, поэтому оценить влияние собственно способа введения извести по приведенным данным не представляется возможным.

Подробный анализ существующих математических выражений для производительности конвейерных агломерационных машин, выполненный в работе [146], показывает недостатки и преимущества существующих моделей, представляющих функциональные зависимости от следующих технологических параметров (1.5)-(1.11):

$$G_{\text{ш}} = f(B, H_{\text{ш}}, \rho_{\text{н}}^{\text{ш}}, v_{\text{л}}), \quad (1.5)$$

$$g_{\text{ш}} = f(\rho_{\text{н}}^{\text{ш}}, v_{\text{с}}) \quad (1.6)$$

$$g_{\text{ш}} = f(w_0, V_{\text{в}}) \quad (1.7)$$

$$g_{\text{а}} = f(\rho_{\text{н}}^{\text{ш}}, v_{\text{с}}, k_i, k_{\text{г}}) \quad (1.8)$$

$$g_{\text{а}} = f(\rho_{\text{н}}^{\text{ш}}, v_{\text{с}}, H_{\text{ш}}, \beta) \quad (1.9)$$

$$g_{\text{а}} = f(A) \quad (1.10)$$

$$g_{\text{а}} = f(\Delta, v_{\text{с}}(\beta = 0), a, K, \text{ВП}, \gamma_0, b), \quad (1.11)$$

где $G_{\text{ш}}$ – производительность агломерационной машины по шихте, т/ч;

B – ширина паллет агломашины, м;

$H_{\text{ш}}$ – высота слоя шихты (без постели);

$\rho_{\text{н}}^{\text{ш}}$ – насыпная плотность шихты, кг/м³;

$v_{\text{л}}$ – скорость движения агломерационной ленты, м/мин;

$g_{\text{ш}}$ – удельная производительность агломерационной машины по шихте, т/(м²·ч);

$v_{\text{с}}$ – вертикальная скорость спекания, мм/мин;

w_0 – средняя по длине агломашины скорость фильтрации воздуха через слой;

$V_{\text{в}}$ – удельный расход воздуха на агломерацию, м³/кг спекаемой шихты;

k_i – выход аглоспека из шихты (с учетом летучих, в т.ч. влаги, сгорания углерода твердого топлива, пылеуноса и пр.);

k_r – выход годного агломерата из спека;

β – подача возврата в шихту;

$A = \frac{\Delta P}{w_0^{1,58} \cdot H_{ш}}$ – комплекс, который характеризует структуру и газодинамическое сопротивление слоя шихтовых материалов на машине в целом в течение всего периода спекания;

Δ – коэффициент усадки (отношение высоты слоя аглоспека к исходной высоте слоя шихты);

$v_c(\beta = 0)$ – вертикальная скорость спекания для шихты без добавления возврата;

a – угловой коэффициент уравнения прямой при линейной зависимости вертикальной скорости спекания от количества добавляемого возврата вида $v_c = v_c(\beta = 0) + a \cdot \beta$

K – угловой коэффициент уравнения прямой при линейной зависимости выхода годного агломерата от содержания возврата в сухой шихте вида $ВГ = 100 - K \cdot \beta$ – ВП (ВП – выход из спека агломерата, идущего на формирование постели);

γ_0 – объемная масса аглоспека из шихты без возврата, т/м³;

b – угловой коэффициент уравнения прямой при линейной зависимости объемной массы аглоспека от количества добавляемого возврата вида $\gamma = \gamma_0 + b \cdot \beta$;

Как отмечает в своем анализе автор, существующие выражения для производительности агломашин основаны на неподдающихся непосредственному учету величинах, зависящих от большого числа технологических факторов: скорости движения агломерационной ленты, вертикальной скорости спекания аглошихты, скорости фильтрации воздуха в слое шихты и др. Поэтому предлагается следующая функциональная зависимость производительности машины от следующих явных параметров агломерационного процесса, которые

можно фиксировать во время работы агломашины. К таким параметрам автор относит:

- общее газодинамическое сопротивление слоя шихты;
- высоту слоя шихты;
- температуру аглошихты;
- влажность аглошихты;
- насыпную плотность аглошихты;
- гранулометрический состав сырой окомкованной шихты, который может быть выражен через средневзвешенную крупность шихты, среднюю эквивалентную по поверхности крупность, порозность слоя, средний эквивалентный диаметр частиц и другими аналогичными величинами;
- продолжительность спекания шихты;
- содержание углерода в шихте;
- долю возврата или выход годного агломерата;
- долю тонких концентратов в шихте.

Кроме набора технологических параметров, входящих в приведенные выше уравнения, на производительность агломашин могут оказывать систематическое влияние трудно формализуемые факторы. Так, оптимизация соотношения между известью, подаваемой в зимний период в шихтовое отделение аглофабрики №5 ПАО «ММК» (для подогрева шихты перед окомкованием), и известью, подаваемой на усреднительный склад (для предотвращения смерзания и облегчения забора шихты), при неизменной общей доле извести в 5% по отношению к массе железорудной смеси позволило авторам работы [147] повысить производительность агломерационных машин на 12,0%, по сравнению с периодом, когда известь не подавалась в шихтовое отделение и целиком использовалась для предотвращения смерзания штабелей на усреднительном складе.

1.3.2. Применение связующих добавок

На этапе смешения и окомкования агломерационной шихты большое значение имеют рациональное распределение воды между операциями смешивания и окомкования [148] и выбор частоты вращения барабана [149]. Также широкое распространение получили окомковывающие добавки. Чаще всего используются известь [150], бентонит, измельченные до состояния тонкого порошка материалы, вводимые в состав шихты [151] или добавляемые в барабан с пульпой [152]. Как показано в работе [152], добавки в составе распыляемой пульпы бурожелезняковых руд Новокиевского месторождения (Самарская область) массой до 1,5% от массы сухой ЖРС (без учета сидерита БРУ) улучшали условия окомкования шихты. В результате улучшалась однородность шихты по крупности, что обеспечивало более благоприятный тепловой режим при спекании. Как следствие, росли следующие показатели качества агломерата: прочность агломерата на сбрасывание по ГОСТ 25471-82 с 84,26% до 86,39% (на 2,5% (отн.)); прочность агломерата на удар по содержанию класса крупности +5 мм после испытания по ГОСТ 15137-77 - с 61,72% до 73,13% (на 18,5% (отн.)); истирание агломерата по содержанию класса крупности 0-0,5 мм после испытания по ГОСТ 15137-77 снизилось с 5,70% до 5,29% (на 7,2% (отн.)). При этом возросли также вертикальная скорость спекания шихты, с 14,16 мм/мин до 16,23 мм/мин (на 14,6%)

Выводы по главе 1

Проведенный обзор состояния разработанности вопроса о выборе рациональной шихты для получения качественного агломерата при высоких технико-экономических показателях агломерационного процесса показал необходимость разработать научно обоснованные рациональные составы агломерационных шихт применительно к современным условиям работы агломерационных машин для улучшения технико-экономических показателей аглопроцесса и качества агломерата. Для достижения поставленной цели были сформулированы задачи по разработке и обоснованию рационального состава железорудной части шихты для современных условий работы агломерационных машин, с учетом доступности и надежности поставок сырьевых компонентов; оценке действия связующих добавочных материалов на окомкование, ход агломерационного процесса и показатели качества готового агломерата, в том числе холодную и горячую прочность, усадку агломерата и перепад давления газа в слое после восстановления под статической нагрузкой; исследования показателей агломерационного процесса и качества получаемого агломерата при изменении в составе шихты агломерационных руд и концентратов.

2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ПОЛУЧЕНИЮ АГЛОМЕРАТА И ИССЛЕДОВАНИЮ ЕГО ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

2.1 Подготовка агломерационной шихты к спеканию

2.1.1 Компонентный состав агломерационной шихты

Для проведения экспериментов по спеканию агломерата формировали агломерационные шихты, включающие следующее железорудное сырье:

- концентраты Лебединского, Михайловского, Соколовско-Сарбайского и Ковдорского ГОКов и Михайловский флотоконцентрат отдельно и в смеси по различным вариантам:

- 25% Лебединский, 75% Михайловский;
- 50% Лебединский, 50% Михайловский;
- 75% Лебединский, 25% Михайловский;
- 25% Лебединский, 75% ССГПО;
- 50% Лебединский, 50% ССГПО;
- 75% Лебединский, 25% ССГПО;
- 25% Михайловский, 75% ССГПО;
- 50% Михайловский, 50% ССГПО;
- 75% Михайловский, 25% ССГПО;
- 33% Лебединский, 33% Михайловский и 33% ССГПО;
- 25% Лебединский, 25% Михайловский и 50% ССГПО;
- 25% Лебединский, 50% Михайловский и 25% ССГПО;
- 50% Лебединский, 25% Михайловский и 25% ССГПО;
- 25% Лебединский, 75% Михайловский флотоконцентрат;
- 50% Лебединский, 50% Михайловский флотоконцентрат;
- 75% Лебединский, 25% Михайловский флотоконцентрат;
- 33 % Лебединский, 33% Михайловский флотоконцентрат и 33% ССГПО;
- 25 % Лебединский, 25% Михайловский флотоконцентрат и 50% ССГПО;
- 25 % Лебединский, 50% Михайловский флотоконцентрат и 25% ССГПО;

- 50% Лебединский, 25% Михайловский флотоконцентрат и 25% ССППО;
- агломерационные руды Михайловского, Богословского, Стойленского; Сосновского и Туканского месторождений отдельно и в смеси по вариантам:
 - 25% Михайловская, 75% Богословская;
 - 50% Михайловская, 50% Богословская;
 - 75% Михайловская, 25% Богословская;
 - 25% Михайловская, 75% Стойленская;
 - 50% Михайловская, 50% Стойленская;
 - 75% Михайловская, 25% Стойленская;
 - 25% Богословская, 75% Стойленская;
 - 50% Богословская 50% Стойленская;
 - 75% Богословская, 25% Стойленская;
 - 33% Михайловская, 33% Богословская, 33% Стойленская;
 - 25% Михайловская, 25% Богословская, 50% Стойленская;
 - 25% Михайловская, 50% Богословская, 25% Стойленская;
 - 50% Михайловская, 25% Богословская, 25% Стойленская.

Соотношение между железорудными концентратами в смеси изменяли при сохранении их общей доли от массы рудной части шихты, равной 72,2%. Соотношение между аглорудами в смеси изменяли при сохранении их общей доли от массы рудной части шихты, равной 19,0%.

Полный компонентный состав железосодержащей части аглошихты приведен в табл. 2.1. Он включал 70% рудной части шихты и 30% возврата.

Таблица 2.1

Компонентный состав железосодержащей части аглошихты

Материал	Содержание, %
Возврат	30,0
Рудная часть шихты, из них:	70,0
Смесь концентратов	50,5
Смесь аглоруд	13,3
Отсев окатышей Лебединских	2,7
Известь	3,5
Всего	100,0

Основность шихты в этих опытах поддерживали равной 1,6, ориентируясь на среднюю основность агломерата, производимого на фабрике №5 ПАО «ММК» в первой половине 2022 г. Содержание углерода составляло 4,0% и также определялось по среднему значению углерода в шихте на аглофабрике №5 в течение первого полугодия 2022 г., к которому прибавляли 0,5% углерода на компенсацию теплотеря лабораторной установки. Высота спекаемого слоя составляла 300 мм. Расход железорудной смеси на один опыт, обеспечивающий получение достаточного объема аглошихты на одно спекание ее в аглоустановке, составлял от 1600 г до 1650 г. Общая масса сухой аглошихты, включающей железорудную смесь, возврат, коксик и известняк, составляла 2700 г.

Для изучения влияния окомковывающих добавок на параметры окомкования агломерационной шихты исследовали следующие материалы:

- Интерполимерное связующее (ИПС);
- Отходы сероулавливающей установки (СУУ);
- Бентонит.

Интерполимерное связующее предлагается на современном рынке окомковывающих добавок в качестве альтернативы извести при отсутствии оборудования для хранения и использования извести на аглофабрике, но может быть также использована для усиления окомковывающих свойств извести в случае замены ее части в составе аглошихты. Состав ИПС представлен смесью низковязкого анионного полимера полисахаридного ряда с вязкостью однопроцентной суспензии менее 5 мПа×с (20-40%), высоковязкого неионного полиакриламида, с вязкостью однопроцентной суспензии более 5 мПа×с (5-10%) и минеральной добавки (75-50%). Качественные показатели минеральной составляющей используемой в данном исследовании разновидности ИПС приведены в табл. 2.2.

Качественные показатели интерполимерного связующего

Наименование показателей	Величина показателя
Массовая доля влаги, %, не более	11,0
Индекс набухания, мл/2 г	25,0
Эффективная вязкость 10% суспензии, мПа*с	60,0
Остаток на сите №0,071, %, не более	35,0

Агломерационная шихта серии экспериментов с окомковывающими добавками состояла из рудной части – 75% от массы рудной части шихты, или 2000 г., и возврата – 25% от массы рудной части шихты, или 670 г. Расход сухой железорудной смеси на одно спекание составлял 2670 г.

Рудная часть агломерационной шихты включала:

- концентрата ССГПО класса крупности < 0,5 мм (76,5% мас.);
- аглоруда Михайловская (20,0% мас.) двух классов крупности, 0-3 мм (90% мас. от содержания аглоруды) и 3-8 мм (10% мас. от содержания аглоруды);
- известь класса крупности 0-3 мм (3,5%).

2.1.2 Химический состав компонентов агломерационной шихты

Определение химического состава минеральных компонентов шихты, включая железорудные концентраты, агломерационные руды, возврат, известь, известняк и золу коксика, а также получаемого агломерата производилось на рентгеновском энергодисперсионном спектрометре ARL QUANT'X компании Thermo Scientific (Лаборатория спектральных методов анализа кафедры Metallургии и химических технологий «МГТУ им Г.И. Носова», Магнитогорск). Спектрометр ARL QUANT'X позволяет производить анализ в диапазоне от Na до U, измеряя содержание элементов в пределах от менее 1 ppm до 100%. Определение массовых долей оксидов магния, алюминия, кремния, кальция, марганца, серы, фосфора и железа общего проводилось рентгенофлуоресцентным методом. Измерения проводились с помощью программного пакета WinTrace. Основные характеристики спектрометра ARL QUANT'X представлены в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Основные технические характеристики спектрометра ARL QUANT'X

Параметр	Значение параметра
Анод трубки	стандартно Rh, дополнительно Ag
Мощность излучения	максимум 50 Вт
Напряжение	4-50 кВ с шагом 1 кВ
Ток	0,02-1,98 мА с шагом 0,02 мА
Тип детектора	Кремний-литиевый кристалл с электронным охлаждением
Площадь кристалла	15 мм ² PCD
Толщина кристалла	3,5 мм (3500 мкм)
Энергетическое разрешение	менее 135 эВ PCD

Спектральные методы количественного анализа основаны на сравнении интенсивности характеристической линии определяемого элемента в анализируемом образце с интенсивностью той же линии в образце с известным содержанием (такой образец обычно называют градуировочным или калибровочным). Для построения градуировочных характеристик использовались стандартные образцы (СО) руд и концентратов с аттестованными значениями содержания анализируемых химических элементов, имеющие соответствующие паспорта. Известняк, известь, золу коксика анализировали полуколичественным бесстандартным методом. Для подтверждения результатов определения общего железа часть проб руд, концентратов и агломератов анализировали химическим методом по ГОСТ 32517.1-2013 (ISO 2597-1:2005). Железо двухвалентное определяли титрованием, по ГОСТ Р 53657-2009.

Химический состав железорудных компонентов аглошихты приведен в табл. 2.4.

Как видно из представленных в табл. 2.4 данных, среди железорудных концентратов самые высокие содержания железа общего имеют Михайловский флотационный концентрат ($Fe_{\text{общ}} = 67,8\%$) и концентрат Лебединского ГОК ($Fe_{\text{общ}} = 69,3\%$).

Химический состав железорудных компонентов аглошихты

Вид материала	Содержание, %								
	ППП*	Fe	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	S	P	MnO
Михайловский флотационный концентрат	0,69	67,8	0,28	4,95	0,14	0,10	0,010	0,006	0,02
Михайловский стандартный концентрат	0,59	65,2	0,23	8,43	0,28	0,01	0,012	0,009	0,01
Концентрат ССГПО	0,98	65,7	0,96	4,22	1,15	1,44	0,350	0,016	0,20
Концентрат Лебединский	0,43	69,3	0,11	3,18	0,32	0,10	0,154	0,007	0,05
Концентрат Ковдорский	0,7	63,9	0,42	1,16	5,41	1,67	0,31	0,045	0,55
Аглоруда Михайловская	5,10	51,9	1,78	16,90	0,55	1,49	0,297	0,031	0,07
Аглоруда Богословская	3,95	50,8	8,50	9,95	1,47	2,85	2,680	0,024	0,24
Аглоруда Стойленская	8,8	53,0	1,50	10,80	0,73	2,85	0,412	0,067	0,07
Аглоруда Сосновская	3,49	49,8	7,90	13,30	1,57	3,97	1,910	0,030	0,23
Аглоруда Туканская	9,80	50,6	0,10	10,40	0,07	2,50	0,412	0,140	0,66
Аглоруда Бапы	0,46	52,3	0,50	13,80	26,30	0,46	0,140	0,060	0,330
Отсев Лебединских окатышей	0,34	66,8	1,19	2,71	0,32	0,48	0,032	0,007	0,05

Наименьшее содержание железа наблюдается у концентрата Ковдорского ГОК (63,9%). Концентрат Михайловский стандартный имеет относительно невысокое содержание железа (65,2%) и требует повышенного расхода известняка на офлюсование из-за кислой вмещающей породы, богатой SiO_2 (8,43%). Самое высокое значение основности среди концентратов, равное 0,23 ед., относится к Соколовскому концентрату.

Минимальным содержанием оксида магния (0,14%) среди исследуемых железорудных концентратов характеризуется Михайловский флотационный концентрат, кроме того, относительно невысокие концентрации данного оксида отмечаются в Михайловском стандартном концентрате (0,28%) и Лебединском концентрате (0,32%). В концентрате ССГПО содержание оксида магния значительно выше его содержания в трех перечисленных выше концентратах и составляет 1,15%. Самое высокое содержание оксида магния (5,41%) демонстрирует Ковдорский концентрат. Повышенным содержанием серы среди концентратов выделяются концентрат ССГПО (0,35%) и Ковдорский концентрат (0,31%), а также Лебединский концентрат (0,154%), в то время как обе разновидности Михайловских концентратов (стандартный и флотационный) имеют содержание серы на уровне всего лишь 0,010-0,012%.

Среди агломерационных руд повышенные содержания железа общего имеют Стойленская аглоруда (53,0%) и аглоруда месторождения Бапы (52,3%), в то время как в остальных аглорудах уровень содержания железа более низкий (49,8 – 51,9%). Наибольшие величины отношения по CaO/SiO_2 характерны для Богословской аглоруды (0,85 ед.) и Сосновской аглоруды (0,59 ед.), в то время как для остальных руд аналогичные значения лежат значительно ниже, в интервале от 0,01 ед. до 0,14 ед. Самое высокое содержание SiO_2 (16,9%) отмечается у Михайловской аглоруды, руды месторождения Бапы (13,84%) и Сосновской аглоруды (13,30%) в то время как для всех других аглоруд содержание кремнезема существенно меньше и находится в относительно узком интервале от 9,95% до 10,80%. Повышенное содержание MgO характерно для руды месторождения Бапы (26,3%), Сосновской (1,57%) и Богословской (1,47%) аглоруд, в то время как для остальных исследуемых агломерационных руд содержание оксида магния в несколько раз

ниже и составляет от 0,07% до 0,73%. Богословская и Сосновская руды также отличаются высокими содержаниями серы, 2,680% и 1,910% соответственно, в то время как для остальных аглоруд содержание серы существенно ниже и лежит в интервале от 0,140% до 0,412%.

Химический состав различных разновидностей Туканской руды приведен в табл. 2.5. Содержание железа в руде варьировалось в зависимости от разновидности от 34,0% до 50,6%, в то время как содержание диоксида кремния изменялось в диапазоне от 10,4% до 29,3%. Все разновидности руды характеризовались относительно высокими потерями при прокаливании (8,37-10,60%), по-видимому, связанными с разложением гидратированных минералов. Наиболее мелкие фракции немытой руды содержали значительное количество оксида алюминия (5,60-8,40%), вероятно, входящего в состав глин вмещающих пород. Немытые руды также имели повышенную рабочую влажность (до 5,90%) и содержание щелочей (по оксиду K_2O) на уровне 1,48-2,10%. Все разновидности руд содержали в количестве от 0,66% до 1,60% оксид марганца, оказывающий при умеренном содержании его в готовой стали положительное воздействие на ее характеристики. Разновидность №1 (I фабрика) отличалась повышенным содержанием MgO (1,00% против 0,07-0,35% для остальных шести разновидностей этой руды).

В процессе проведения исследований использовали возврат, специально получаемый для каждого опыта. Поэтому первые спекания использовали для получения возврата из шихт, не содержащих возврат. Химический состав возврата, таким образом, различался для каждого конкретного опыта и не изменялся лишь при проведении повторных спеканий.

Химический состав нерудных компонентов аглошихты приведен в табл. 2.6 и 2.7.

Таблица 2.5

Химический состав различных разновидностей Туканской агломерационной руды

№ п/п	Место отбора пробы	Класс крупности, мм	Содержание, % (мас.)										ППП*	W**
			Fe _{общ}	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	K ₂ O	ZnO	P ₂ O ₅		
1	I фабрика	0-40	34,0	29,3	0,60	1,00	8,40	0,36	0,95	2,03	0,03	0,10	8,37	0,86
2	II фабрика	20-40	47,6	12,0	0,42	0,13	5,10	0,32	1,12	1,34	0,04	0,09	10,6	2,10
		40-100	50,6	10,4	0,10	0,07	2,50	0,10	0,66	0,70	0,06	0,11	9,80	1,00
3	Ж/д станция	0-5	38,7	22,5	0,10	0,35	7,10	0,26	1,13	1,91	0,04	0,13	10,4	4,00
		40-100	45,7	13,2	0,10	0,14	3,75	0,20	1,00	1,35	0,03	0,10	9,10	1,03
4	Западная Майгашля	0-5	40,8	19,5	0,26	0,20	5,60	0,30	1,60	1,48	0,03	0,13	9,6	5,90
5	Шламонакопитель	0-8	41,1	19,3	0,15	0,35	8,20	0,23	1,10	2,10	0,03	0,10	9,40	5,45

*) – потери массы материала при прокаливании при температуре 900 °С в течение 1 ч;

***) – рабочая влажность материала.

Таблица 2.6

Химический состав нерудных компонентов аглошихты

Вид материала	Содержание, %					
	ППП*	Fe	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃
Известь	3,0	0,2	88,0	0,20	6,00	0,30
Известняк	44,5	-	48,9	0,73	5,23	0,22
Зола коксовой мелочи	-	6,5	6,2	50,5	8,9	22,6

Таблица 2.7

Показатели технического анализа коксовой мелочи, %

A ^d	V ^{daf}	W ^r	C	S
13,0	1,0	21,2	86,2	0,48

Как видно из табл. 2.6, используемые в исследовании известь и известняк содержали значительные количества оксида магния (6,00% и 5,23% соответственно), поэтому в случае потребности в значительном количестве известняка на офлюсование (например, при использовании в качестве моноконцентрата Михайловского стандартного концентрата) полученный агломерат содержал значительные количества MgO. Следует отметить, что в состав известняка оксид магния входит преимущественно в форме доломита CaCO₃·MgCO₃, что обеспечивает его повышенную доступность как в процессе агломерации (эффективное растворение в формирующемся расплаве), так и при последующей доменной плавке полученного агломерата (повышенная восстановимость), по сравнению с оксидом магния, входящим в состав минералов с кристаллической решеткой шпинели (в составе сидероплезита, ряда других рудных и нерудных природных минералов).

Химический состав используемых окомковывающих добавок приведен в табл. 2.8.

Таблица 2.8

Химический состав исследуемых добавочных материалов, %

Вид материала	CaO	SiO ₂	TiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₅	ППП*	W
Интерполимерное связующее	4,30	52,00	1,10	3,40	22,00	-	0,62	-	0,085	8,43	8,84
Отходы СУУ:											
- исходные	34,52	0,85	-	0,69	1,05	0,43	-	47,27	-	15,50	24,60
- прокаленные при температуре 160 °С	39,23	0,97	-	0,78	1,19	0,49	-	53,72	-	4,11	0,06
- прокаленные при температуре 600 °С	40,61	1,00	-	0,81	1,24	0,51	-	55,61	-	0,16	0,02
Бентонит	4,00	51,60	1,04	4,50	22,50	-	0,59	-	-	8,08	9,27

*) потери при прокаливании

2.1.3 Гранулометрический состав компонентов агломерационной шихты

Результаты ситового анализа использованных в аглошихте железорудных концентратов приведены в табл. 2.9.

Таблица 2.9

Гранулометрический состав используемых в аглошихте железорудных концентратов

Концентрат, %	Интервал крупности, мкм						Всего
	+100	71-100	63-71	50-63	40-50	0-40	
ССГПО	4,8	7,4	0,5	9,6	9,6	68,1	100,0
Михайловский флотационный	0,5	1,0	0,5	2,6	7,9	87,4	100,0
Михайловский стандартный	-	2,2	0,5	3,3	9,8	84,2	100,0
Лебединский	-	-	-	-	8,1	91,9	100,0
Ковдорский	42,9	20,4	1,0	6,1	6,1	22,4	100,0

Как видно из таблицы, все концентраты кроме Ковдорского, имеют высокое содержание тонкой фракции 0-40 мкм (от 68,1 до 91,9% (мас.)), в то время как в Ковдорском концентрате на эту фракцию приходится лишь 22,4%, а основная часть оставшейся массы материала сосредоточена в наиболее крупных фракциях материала (во фракции 71-100 мкм – 20,4%, во фракции +100 мкм – 42,9%).

Крупность используемых аглоруд приведена в табл. 2.10. В Стойленской и Туканской аглорудах соотношение между количеством фракции 0-3 мм и 3-8 мм составляет 1:1, в Михайловской, Богословской и Сосновской аглорудах, а также в руде месторождения Бапы, преобладает тонкая фракция 0-3 мм (от 70,0 до 74,8%).

Поскольку при окомковании агломерационной шихты частицы крупностью свыше 1,6 мм становятся зародышами, на которые накатывается комкующая часть, то при большой доле тонких железорудных концентратов возрастает роль агломерационной руды как источника зародышей для окомкования, и повышенная доля фракции 3-8 мм в составе аглоруды в этом случае будет способствовать улучшению окомкования.

Гранулометрический состав различных разновидностей Туканской агломерационной руды приведен в табл. 2.11.

Таблица 2.10

Гранулометрический состав исследуемых аглоруд

Аглоруда	Содержание класса, %	
	0-3 мм	3-8 мм
Михайловская	74,8	25,2
Богословская	71,0	29,0
Стойленская	50,0	50,0
Сосновская	70,0	30,0
Туканская	50,0	50,0
Бапы	73,0	27,0

Таблица 2.11

Гранулометрический состав различных разновидностей Туканской агломерационной руды

№ п/п	Место отбора пробы	Класс крупности, мм	Содержание класса (%) после дробления	
			0-3 мм	3-8 мм
1	I фабрика	0-40	57,1	42,9
2	II фабрика	20-40	37,8	62,2
		40-100	49,5	50,5
3	Ж/д станция	0-5	59,1	40,9
		40-100	59,5	40,5
4	Западная Майгашля	0-5	67,8	32,2
5	Шламонакопитель	0-8	51,3	48,7

Разновидности руд Туканского месторождения крупностью, превышающей 8 мм, дробили до крупности 0-8 мм, после чего определяли содержание класса 0-3 и 3-8 мм (табл. 2.11).

Как видно из табл. 2.11, содержание класса 3-8 мм является максимальным для разновидности №2 (II фабрика, фр. 20-40 мм) Туканской аглоруды и составляет для нее 62,2%. Более крупная исходная Туканская аглоруда с того же места отбора (II фабрика, фр. 40-100 мм) дает при дроблении несколько меньшую долю (50,5%) крупного класса 3-8 мм. Также повышенной долей крупного класса отличается разновидность №5 (из шламонакопителя, фракция 0-8 мм), содержащая 48,7% класса 3-8 мм.

Менее благоприятный для формирования крупных гранул сырой окомкованной шихты гранулометрический состав имеет разновидность №4 (Западная Майгашля, 0-5 мм), которая содержит лишь 32,2% крупного класса 3-8 мм. Отчасти сниженное количество крупного класса 3-8 мм при расसेве данной разновидности руды объясняется тем, что размер кусков при ее первичном дроблении был ограничен величиной в 5 мм.

Разновидности №3 (железнодорожная станция) обоих классов крупности (40-100 мм и 0-5 мм) и №1 (I фабрика, 0-40 мм) Туканской агломерационной руды дают при рассеве после дробления (для разновидности №3, фракция 0-5 мм дробление не требовалось) соответственно 40,5%, 40,9% и 42,9% крупного класса 3-8 мм, занимая таким образом по крупности промежуточное положение среди различных разновидностей Туканской руды.

Для получения возврата аглоспек пропускали через лабораторную щековую дробилку с зазором между щеками в момент их максимального расхождения в 5 мм. Продукт дробления просеивали через решето с диаметром ячеек 5 мм. Класс +5 мм повторным дроблением доводили до крупности 0-5 мм. Смесь продуктов дробления возврата класса 0-5 мм тщательно перемешивали. Для проведения опыта использовали возврат классов крупности 0-3 мм и 3-5 мм в предварительно установленных рассевами соотношениях (табл. 2.12).

Таблица 2.12

Гранулометрический состав возврата, известняка и коксовой мелочи

Название материала	Содержание класса крупности, % (мас.)		
	3-5 мм	2-3 мм	0-2 мм
Возврат	52	48	
Известняк	-	20	80
Коксовая мелочь	-	13	87

Весь запас известняка, необходимый для проведения исследования, просеивали через решето с диаметром ячеек 3 мм. Класс +3 мм пропускали через лабораторную щековую дробилку с отсутствием зазора между щеками. Продукт дробления просеивали через решето с диаметром ячеек 3 мм. Класс +3 мм повторным дроблением доводили до крупности 0-3 мм. Смесь продуктов дробления известняка класса 0-3 мм тщательно перемешивали.

Весь запас коксика, необходимого для проведения исследования, подготавливали к использованию в аглошихте аналогично известняку.

Гранулометрический состав известняка и коксика, использованных в исследованиях, также приведен в табл. 2.12.

Весь запас извести, необходимой для проведения исследования, просеивали через решето с диаметром ячеек 10 мм. Класс +10 мм пропускали через лабораторную щековую дробилку с зазором между щеками 10 мм. Продукт дробления просеивали через решето с диаметром ячеек 10 мм. Класс +10 мм повторным дроблением доводили до крупности 0-10 мм. Смесь продуктов дробления извести класса 0-10 мм тщательно перемешивали.

Ситовый состав используемых для улучшения окомкования добавок приведен в табл. 2.13.

Для металлодобавок (отсев Лебединских окатышей) и извести определение гранулометрического состава не проводили.

Ситовый состав исследуемых окомковывающих добавок, %

Вид материала	Выход (%) по классам крупности (мм)				
	+0,1	0,1-0,071	0,071-0,063	0,063-0,05	-0,05
Интерполимерное связующее	35,00		65,00		
Бентонит	35,00		65,00		
Отходы СУУ:					
- исходные	10,20	3,06	1,02	85,71	
- прокаленные при температуре 160 °С	6,19	2,06	1,85	89,90	
- прокаленные при температуре 600 °С	3,03	1,01	5,24	90,72	

2.1.4 Расчет агломерационной шихты

Расход известняка рассчитывали по массе железорудной смеси, т.е. без возврата, в нашем случае масса железорудной смеси составляла 1600-1650 г, исходя из вместимости лабораторной аглочаши.

Расход коксика рассчитывали по всей сухой массе шихты (железорудное сырье, состоящее из концентрата, аглоруды, отсева окатышей и извести (ЖРС) + известняк на офлюсование ЖРС (И) + возврат (В) + коксик (К)) по уравнению (2.1):

$$\frac{87,0 \cdot K + 0,5 \cdot B}{ЖРС + И + В + К + q \cdot K} = C, \quad (2.1)$$

где 87,0 и 0,5 – содержание углерода соответственно в коксике и возврате, %;

q – количество известняка потребное для офлюсования SiO₂ в 1 грамме коксика, г;

C – содержание углерода в шихте, %.

Решение этого уравнения относительно К дает выражение (2.2):

$$K = \frac{(ЖРС + И + В) \cdot C - 0,5 \cdot B}{83,5 - (1 - q) \cdot C}, \% \quad (2.2)$$

2.1.5 Дозировка компонентов рудной смеси, их предварительное смешение и увлажнение. Закладка рудного штабеля

Взвешенные железорудные концентраты, взвешенные по классам аглоруды и известь загружали в общий контейнер – сборник рудных компонентов шихты.

Подача в шихту рудных материалов производилась в следующей строго сохраняемой последовательности: концентрат, аглоруда и известь. Это обеспечивало лучшую воспроизводимость опытов из-за формирования в процессе обработки шихты в смесителе – окомкователе одинаковых от опыта к опыту условий смешения шихты.

По окончании взвешивания всех компонентов проводили контрольное взвешивание железорудной части шихты. Отклонение этой массы от расчетной не превышало 2%.

После дозировки компонентов железорудной части смеси производили их предварительное смешивание и увлажнение.

Увлажнение железорудной смеси осуществляли, исходя из условий летнего времени года, когда концентрат поступает на аглофабрику с влажностью до 6,5%. В производственных условиях такой концентрат закладывают в штабели на складах с аглорудой и известью, где происходит физическое и химическое взаимодействие между компонентами. Поскольку в лаборатории использовали воздушно-сухой концентрат, то для моделирования «летних условий» его доувлажняли в барабане (предварительное увлажнение) вместе с аглорудой и известью до влажности 6,5%, что соответствовало 5,0% влаги от общей массы, закладываемой в штабель железорудной смеси. Увлажненный материал извлекали из барабана и взвешивали сначала перед закладкой в штабель, а затем после взятия штабеля в работу; по потере массы штабеля определяли количество воды, требуемое с целью доувлажнения шихты до расчетного влагосодержания.

Расход воды на увлажнение шихты В, г, определяли по формуле (2.3):

$$B = \frac{W_{\text{ш}} \cdot m_{\text{ш}}}{100} + \frac{m_{\text{изв}} \cdot 0,8 \cdot 18}{56} - m(H_2O)_{\text{жрс}} + \Delta, \quad (2.3)$$

где $W_{\text{ш}}$ - заданная влажность шихты, %;

$m_{\text{ш}}$ – масса шихты, г;

$m_{\text{изв}}$ – масса извести в шихте, г;

$m(H_2O)_{\text{жрс}}$ – масса воды, г, добавляемой на этапе предварительного увлажнения штабеля ЖРС;

Δ - потери воды штабелем, г, в процессе высыхания.

Рассчитанное таким образом недостающее количество воды В распределяли в дальнейшем между операциями смешивания и окомкования в отношении 80 : 20.

2.1.6 Дозировка нерудных компонентов

Взвешенные по классам возврат, коксик и известняк загружали в общий контейнер – сборник нерудных компонентов шихты.

Подача в шихту нерудных материалов производилась в следующей строго сохраняемой последовательности: возврат, коксик и известняк. Это обеспечивало лучшую воспроизводимость опытов из-за формирования в процессе обработки шихты в смесителе – окомкователе одинаковых от опыта к опыту условий, как смешения шихты, так и ее окомкования.

По окончании взвешивания всех компонентов проводили контрольное взвешивание нерудной части шихты. Отклонение этой массы от расчетной не превышало 2%.

2.1.7 Смешивание и окомкование аглошихты

Смешивание, увлажнение и последующее окомкование компонентов шихты проводили в одном агрегате, смесителе-окомкователе, который представляет собой пустотелый цилиндрический барабан диаметром по рабочей поверхности 320 мм и длиной 125 мм, оснащенный шестью полочками. Частота вращения барабана

составляла 32 мин^{-1} . Угол наклона оси барабана регулировался, и при работе в режиме смещения он составлял 45 градусов к горизонтальной плоскости, что обеспечивало водопадный режим движения материала, требуемый для эффективного смешивания. При работе в режиме окомкования угол наклона оси барабана к горизонтальной плоскости уменьшали до 30 градусов, чтобы движение материала происходило в режиме переката, благоприятствующем окомкованию.

В сухой барабан загружали содержимое железорудного штабеля, затем нерудную часть, после чего включали перемешивание. Сначала в течение 30 с производили перемешивание компонентов без добавления влаги. По истечении 30 с включали пульверизатор, предназначенный для равномерного распыления воды по поверхности шихты, и подавали воду в количестве 80% от расчетного ее содержания в агломерационной шихте за вычетом влаги штабеля. Увлажнение шихты на этапе смещения завершали по мере израсходования воды, после чего продолжали перемешивание увлажненной шихты до достижения временной отметки 3 мин с начала смешивания. По истечении 3 мин с начала смешивания материала барабан выключали, и увлажненная шихта находилась в остановленном барабане без движения на протяжении 1 мин, в течение которой производили тщательную очистку полочек барабана от налипших на них остатков шихты.

На 4-й минуте с начала смешивания барабан вновь включали, для проведения операции окомкования, при этом снижали наклон барабана к горизонтали, чтобы уменьшить высоту подъема материала вдоль стенок и избежать разрушения сформированных сырых окатышей при их падении в ходе окомкования. Материал в барабане при таком угле наклона двигался в режиме переката. В этих условиях проводили увлажнение шихты оставшимся количеством воды (20%) до достижения расчетной влаги, после чего в барабане сразу же отмечалось интенсивное формирование гранул окомкованной шихты. В последующий период в барабане происходило укрупнение и упрочнение образовавшихся при добавлении влаги гранул сырой окомкованной шихты. Излишне крупные гранулы размером более 10 мм измельчали вручную, поскольку наличие таких гранул в составе шихты снижает воспроизводимость экспериментов на используемой

лабораторной установке. Вращение барабана прекращали на отметке в 9 мин с начала смешивания, и окомкованную сырую шихту выгружали в металлический противень, не обстукивая барабан, чтобы избежать переноса в противень неокомкованного гарнисажа с полочек.

2.2 Производство агломерата

Агломерат спекали в аглочаше, выполненной из стальной трубы диаметром в свету 70 мм и высотой 300 мм, которая свободно устанавливается во фланец вакуум-камеры, опираясь на решетку из стального диска с круглыми отверстиями диаметром 2,5 мм. Герметичность места стыковки чаши и фланца вакуум-камеры обеспечивали надлежащей чеканкой в нем увлажненного асбеста.

Аглогаз из вакуум-камеры отсасывали эксгаустером с регулируемой производительностью. Очистка от пыли и охлаждение аглогаса до комнатной температуры осуществлялись прососом его через слой воды в стеклянной бутылке, расположенной между вакуум-камерой и эксгаустером. Вторая бутылка по ходу движения газа не содержала воды и служила каплеуловителем.

Кроме этого, установка оборудована хромель-алюмелевой термопарой для замера температуры в вакуум-камере; тягонапоромером (ТНЖ) с водяным заполнением для определения объема аглогаса, отсасываемого из вакуум-камеры, по перепаду давления на шайбе прибора; водяным манометром для замера разрежения в вакуум-камере. В ходе опыта поминутно фиксировали в журнале наблюдений значения параметров, дающих наглядное представление о течении процесса агломерации, от момента зажигания шихты в аглочаше до окончания опыта.

Подготовка аглоустановки к спеканию шихты заключалась в вышеупомянутой чеканке увлажненным асбестом зазора между вакуум-камерой и наружной поверхностью аглочаши с последующей проверкой герметичности газовоздушного тракта до загрузки шихты в аглочашу. С этой целью верхний срез аглочаши покрывали полиэтиленовой пленкой, которую ладонью плотно прижимали по всему периметру кромки аглочаши.

Далее в работу включали эксгаустер, плавно повышая напряжение до достижения целевого значения разрежения в вакуум-камере, составляющего 500 мм. вод. ст. Отсутствие прососа воздуха, отмечаемое по нулевым показаниям перепада давления на ТНЖ, свидетельствовало о полной герметичности газоздушного тракта на участке вакуум-камера – шайба ТНЖ.

Убедившись в герметичности установки, выключали эксгаустер, после чего на аглочашу надевали теплоизоляционный огнеупорный цилиндрический кожух с толщиной стенки 33 мм и зазором между наружной поверхностью аглочаши и внутренней кожуха 4 мм. Теплоизоляционный кожух уменьшал потери тепла агломерационного процесса во внешнее пространство, способствовал образованию более однородной структуры аглоспека по высоте. Зазор между аглочашей и кожухом сверху перекрывали асбестовой прокладкой.

В качестве постели использовали возврат крупностью 3-5 мм. Для сохранения одинаковой от опыта к опыту высоты слоя постели в аглочаше ее отмеряли при помощи шайбы диаметром 70 мм и высотой 25 мм. Из равенства диаметров в свету шайбы и аглочаши (70мм) высота слоя постели в аглочаше от опыта к опыту составляла 25 мм. Затем постель из шайбы перегружали в аглочашу. Поверхность слоя постели в аглочаше выравнивали поворотом на ней горизонтального диска с закрепленными на нем тремя радиальными лопастями.

Устанавливали загрузочную воронку в ее опору, стоящую над аглочашей, совмещая ось воронки с осью аглочаши. Зазор между срезом аглочаши и нижней кромкой воронки составлял 25 мм и он сохранялся постоянным от опыта к опыту.

Через загрузочную воронку небольшими порциями крест – накрест загружали шихту в аглочашу так, что поверхность слоя шихты располагалась в ней ниже верхней кромки чаши на 15 мм.

На выровненную поверхность шихты насыпали 30 г коксика для зажигания класса 2-3 мм, который, будучи выровненным в аглочаше, располагался слоем высотой около 15 мм. Сжигание коксика зажигания на поверхности спекаемого слоя шихты выравнивает тепловой режим аглопроцесса по всей высоте спекаемого слоя и тем самым обеспечивает более равномерную структуру аглоспека по его

высоте от опыта к опыту, наряду с равномерным зажиганием шихты в верхних горизонтах спекаемого слоя по горизонтальным сечениям.

Высоту слоя спекаемой шихты ($H_{ш}$, мм) в аглочаше находили по выражению (2.4):

$$H_{ш} = 300 - H_{п} - H_{к}, \quad (2.4)$$

где 300 – высота аглочаши, мм;

$H_{п}$ – высота постели, мм;

$H_{к}$ – высота слоя коксика зажигания, мм.

Высота слоя коксика зажигания от опыта к опыту оставалась практически одинаковой, равной 15 мм. Поэтому высота слоя спекаемой шихты в аглочаше составляла:

$$H_{ш} = 300 - 25 - 15 = 260 \text{ мм}$$

Зажигали спекаемый слой шихты с помощью зажигательного горна, предварительно центрируя его относительно оси аглочаши и располагая так, что нижняя кромка горна находится над верхним срезом аглочаши на высоте около 5 мм. Продолжительность зажигания составляла точно 2 минуты.

По ходу спекания поминутно фиксировали следующие параметры:

- Время от начала зажигания, мин.
- Разрежение в вакуум-камере, мм. вод. ст.
- Температура в вакуум-камере, °С.
- Перепад давления на шайбе ТНЖ, мм. вод. ст.

Рассчитывали коэффициент сопротивления спекаемого слоя прохождению газового потока в начале зажигания, в момент окончания спекания и в момент окончания опыта. Момент окончания процесса спекания фиксировали с секундной точностью по соответствующей ему температуре в вакуум-камере.

Опыт заканчивали при снижении температуры в вакуум-камере после окончания спекания до 100 °С; момент окончания опыта фиксировали с точностью до 10 секунд.

Уровнемером измеряли расстояние от верхнего среза аглочаши до поверхности спеченного слоя (H_y) и рассчитывали усадку слоя (ΔH_c), вычитая из этого расстояния высоту слоя сгоревшего коксика зажигания (15 мм), то есть (2.5):

$$\Delta H_c = H_y - 15, \text{ мм} \quad (2.5)$$

Относительную усадку слоя шихты после спекания $\Delta H_{от}$ рассчитывали по уравнению (2.6):

$$\Delta H_{от} = \Delta H_c / H_{ш} \cdot 100, \%, \quad (2.6)$$

где ΔH_c – усадка слоя, мм;

$H_{ш}$ – высота слоя загруженной в аглочашу шихты, мм.

2.3 Определение удельной производительности аглоустановки и оценка прочности агломерата

Определив усадку слоя при спекании, извлекали спек из аглочаши, обстукивая ее молотком для полного удаления полученного агломерата.

Аглоспек пропускали через щековую дробилку с зазором между щеками в момент их максимального расхождения в 18 мм. Продукт дробления рассеивали на решете с диаметром отверстий 5 мм. Взвешивали массы классов +5 мм и 0-5 мм, фиксируя их значения в рабочем журнале. С целью контроля точности взвешивания определяли сумму масс классов +5 мм и 0-5 мм, сопоставляя ее с массой аглоспека (МА), загруженного в дробилку. За выход годного агломерата в граммах (B_r) из аглоспека принимали массу класса +5 мм.

Определяли относительный выход годного агломерата из аглоспека (ОВГ) по уравнению (2.7):

$$\text{ОВГ} = B_r / \text{МА} \cdot 100, \%, \quad (2.7)$$

где: B_r – выход годного агломерата из аглоспека, г;

МА – масса аглоспека, г.

Удельную производительность аглоустановки (УП) рассчитывали по уравнению (2.8):

$$УП=0,016 \cdot ВГ/\tau_c, \text{ т/м}^2\text{ч}, \quad (2.8)$$

где: 0,016 – коэффициент полученный перерасчетом, грамм в тонны,

площади спекания в квадратные метры, минут в часы;

ВГ – выход годного агломерата из аглоспека, г;

τ_c – продолжительность спекания с момента воспламенения газа под зажигательным горном до окончания спекания, мин.

Прочность годного агломерата оценивали по сопротивлению его ударным и истирающим нагрузкам, которым подвергалась испытываемая проба во вращающейся в вертикальной плоскости со скоростью 27 мин⁻¹ стальной гладкостенной трубе длиной 1000 мм и диаметром в свету 78,5 мм. На испытание в трубу отбирали 1 кг годного агломерата. Продолжительность испытания составляла 8 минут. По завершении испытания извлекали пробу агломерата из трубы и взвешивали ее.

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

Процентное содержание в испытанной пробе агломерата классов +5 мм, 0,5-5 мм и 0-0,5 мм характеризовало, соответственно, сопротивление агломерата удару, его разрушение и истирание.

Расчетное уравнение (2.9) для определения этих характеристик:

$$[СУ, Р, И] = \frac{[M(5), M(0,5 - 5), M(0 - 0,5)]}{МП} \cdot 100\% \quad (2.9)$$

где S_U , P , I – соответственно, сопротивление агломерата удару, его разрушение и истирание, %;

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

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

Основными, определяющими характеристиками прочности агломерата, являются сопротивление его удару и истирание.

2.4 Оценка свойств агломерата после его восстановления под нагрузкой 50 кПа при температурах 500-1100 °С

2.4.1 Определяемые показатели

Для оценки «горячей прочности» агломерата в Лаборатории физико-химических исследований свойств железорудных материалов кафедры металлургии и химических технологий ФГБОУ ВО «МГТУ им Г.И. Носова» были проведены исследования по восстановлению агломерата крупностью 10-15 мм водородом (расход 20 л/час) в ходе изотермической выдержки при температурах 700 и 1100 °С ч.

Оценивали следующие физико-химические свойства компонентов агломерационной шихты:

- восстановимость железорудных материалов;
- перепад давления газа в слое после восстановления;
- усадка слоя железорудных материалов.

Восстановимость железорудных материалов характеризовали степенью восстановления R_t через t минут, выраженной в процентах. Рассчитывали относительно железа (III), используя следующую формулу:

$$R_t = \left[\frac{0,111 \cdot w(\text{FeO})}{0,430 \cdot w(\text{Fe})} \right] + \left[\frac{m_1 - m_t}{m_0 \cdot 0,430 \cdot w(\text{Fe})} \cdot 100 \right] \cdot 100 \quad (2.10)$$

где m_0 – масса навески, г;

m_1 – масса навески непосредственно перед восстановлением, г;

m_t – масса навески после некоторого времени восстановления t , г;

$w(\text{Fe})$ – массовая доля железа общего в пробе, выраженная в процентах, до начала испытаний, и определенная в соответствии с ИСО 2597, ИСО 9507 или ИСО 9508.

$w(\text{FeO})$ – массовая доля железа (II) в пробе, выраженная в процентах, до начала испытаний, вычисленная путем умножения содержания железа (II), определенного в соответствии с ИСО 9035, на коэффициент 1,286.

Перепад давления газа в слое испытуемого материала ΔP_{80} определялся при расходе аргона (высший сорт по ГОСТ 10157-2016) 80 л/мин перед началом испытания (холодный материал), при температурах 700 и 1100 °С соответственно до и после восстановления.

Усадку образца оценивали по изменению высоты слоя материала.

2.4.2 Технические характеристики оборудования

Исследования проводили на электрической вертикальной печи (рис. 2.1) с рамой, реакционной камерой и весовой системой, которая включала:

- три отдельных вертикальных нагревательных зоны, обогреваемые 20 карбидкремневыми нагревателями, с отдельным включением, обеспечивающих равномерный обогрев по окружности и высоте с точностью ± 1 °С в каждой из трех зон;

- реакционный цилиндр внутренним диаметром 125 мм с двойными стенками и фланцами из нержавеющей жаростойкой стали марки AISI 310S (20X23H18) толщиной 8 мм, стойкий к деформации;

- микропроцессорные контроллеры температуры;

- пневматический загрузочный цилиндр для создания равномерного по сечению давления от 1 до 150 кПа на пробу;

- устройство взвешивающее для контроля изменения массы пробы в процессе испытания с точностью $\pm 0,1$ г;

- прибор для определения перепада давления газа-восстановителя в процессе испытания с точностью $\pm 0,1$ кПа;

- устройство для определения высоты слоя материала в реальном времени с точностью $\pm 0,1$ мм;
- термопары К-типа в инконелевом чехле для контроля температуры нагрева пробы и газа-восстановителя в диапазоне 0-1200 °С с точностью ± 1 °С;
- шкаф управления печью.

В качестве газа-восстановителя использовали водород, получаемый при помощи генератора-электролизера марки ГВЧ-36Д производства НПП «Химэлектроника» и имеющий следующие показатели качества:

- объемная доля водорода в пересчете на сухой газ, % об. – 99,998;
- концентрация водяных паров при 20 °С и 1 атм, не более, ppm – 10.

В качестве инертного газа использовали аргон высшего сорта (99,993%) по ГОСТ 10157-2016.



Рисунок 2.1 – Лабораторная печь и шкаф управления (фирма: R.V. AUTOMAZIONE s.r.l., Италия)

2.4.3 Методика проведения испытаний

Пробу агломерата класса крупности 10-15 мм массой (1200 ± 1) г перед испытанием просушивали при температуре (105 ± 5) °С до прекращения изменения массы и перед проведением испытания охлаждали до комнатной температуры.

Загружали пробу в реакционную трубку в следующей последовательности. Два ряда фарфоровых шариков размером от 10,0 мм до 12,5 мм были предварительно помещены на нижнюю перфорированную пластину для достижения равномерного расхода газа. После выравнивания поверхности шариков измеряли высоту фарфорового слоя. Навеску исследуемого материала помещали на слой фарфоровых шариков. После выравнивания поверхности измеряли высоту слоя навески (испытываемого слоя). Затем помещали два ряда фарфоровых шариков размером от 10,0 мм до 12,5 мм на испытываемый слой. После выравнивания вновь измеряли высоту фарфорового слоя.

Испытания проводились в режиме с программируемой температурой. Во время нагрева печи через слой образца пропускали аргон. Во время изотермической выдержки – водород. Режим изменения температуры и переключения газов в зависимости от времени приведен на рис. 2.2. ±

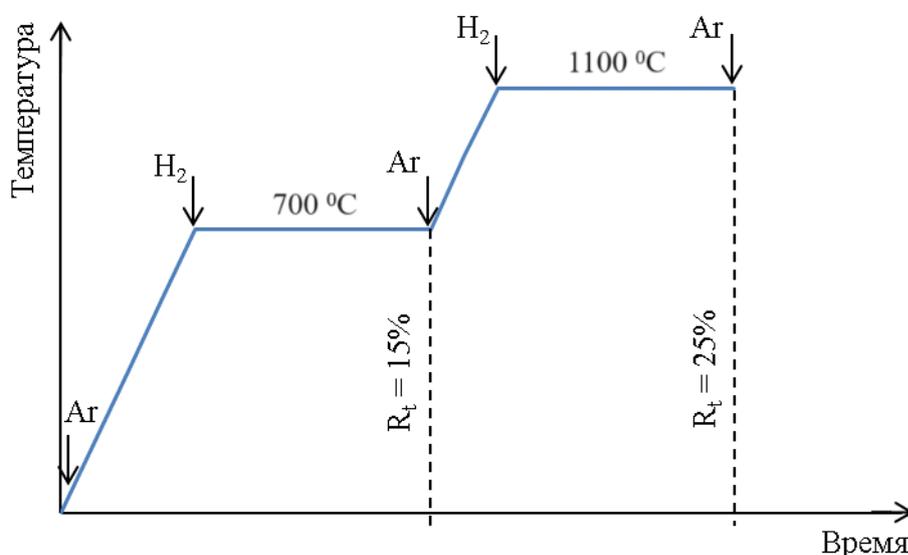


Рисунок 2.2 – Схема изменения температуры и переключения газов при испытаниях агломерата

В начале эксперимента температуру образца, находящегося в токе аргона (60 л/ч), повышали до 700 °C, после чего проводили изотермическое восстановление в токе водорода (20 л/ч) до достижения степени восстановления $R_t = 15\%$. Затем

повышали температуру образца до 1100 °С в токе аргона (60 л/ч) и проводили изотермическое восстановление при 1100 °С в токе водорода (20 л/ч) до степени восстановления $R_f = 25\%$. Перед вводом восстановительного газа в слой образца осуществлялся его подогрев в слое керамических шаров.

При проведении исследований блоком сжимающей нагрузки прикладывали к навеске общую статическую нагрузку в (60 ± 2) кПа, передаваемую через шток из нержавеющей стали и жестко соединенную со штоком неподвижной перфорированной пластиной диаметром (120 ± 1) мм на слой фарфоровых шариков, распределенных по поверхности испытуемой пробы и непосредственно передающих на нее нагрузку. Давление на испытуемый образец измерялось при помощи дифференциального датчика давления.

Перепад давления измерялся при помощи устройства с разрешающей способностью 0,01 кПа. Измерение высоты испытуемого слоя производилось при помощи устройства с разрешающей способностью 0,1 мм. Через определенные промежутки времени осуществлялся контроль за потерями массы навески, за разницей давления газа над и под навеской (перепадом давления), и за высотой испытуемого слоя. Объемы и интенсивность расхода газа измерялись при $t = 0$ °С и атмосферном давлении (101,325 кПа).

3. ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АГЛОМЕРАЦИОННОГО ПРОЦЕССА В НОВЫХ, СОВРЕМЕННЫХ ШИХТОВЫХ УСЛОВИЯХ РАБОТЫ МАШИН ФАБРИКИ № 5 ПАО «ММК»

3.1 Исследование концентратов

Для выяснения рационального соотношения железорудных концентратов для существующей сырьевой базы ПАО «ММК» на первом этапе исследования были подготовлены агломерационные шихты с моноконцентратами Лебединского, Михайловского, Соколовско-Сарбайского и Ковдорского ГОКов, а также с Михайловским флотоконцентратом на основе базовой смеси агломерационных руд, включающей 73,0% Михайловской аглоруды и 27,0% Богословской аглоруды. Полученные результаты позволили выявить перспективные концентраты, обеспечивающие наиболее высокие показатели агломерационного процесса и качество полученного агломерата. Данные железорудные концентраты далее были использованы для составления смесей концентратов и построения концентрационных треугольников.

3.1.1 Результаты спеканий шихт с различными моноконцентратами

Исследовали концентраты Лебединского, Михайловского (стандартная и флотационная разновидности), Соколовско-Сарбайского и Ковдорского ГОКов. Результаты экспериментальных спеканий с различными железорудными концентратами приведены в табл. 3.1.

Как видно из таблицы, наилучшие параметры окомкования шихты были отмечены в случае использования Михайловского стандартного концентрата, так, средневзвешенная крупность сырой окомкованной шихты составила 4,59 мм, а средняя эквивалентная по поверхности крупность – 3,57 мм. Концентрат Ковдорского ГОК обуславливал наименьшие средневзвешенную (3,85 мм) и среднюю эквивалентную по поверхности (2,65 мм) крупности сырой окомкованной шихты, в то время как для остальных концентратов значения средневзвешенной крупности окомкованной шихты находились в интервале от 4,12 мм до 4,36 мм, а средней эквивалентной по поверхности крупности – от 3,14 мм до 3,28 мм.

Параметры окомкования, показатели агломерационного процесса и качества агломерата для шихт на основе моноконцентратов

№ п/п	Показатели	Вид концентрата				
		ССГПО	Михай- ловский	Михайловский флотационный	Лебединский	Ковдорский
1.	Оптимальная влажность шихты, %	8,5	8,5	8,0	8,5	8,5
2	Средневзвешенная крупность сырой окомкованной шихты, мм	4,36	4,59	4,42	4,12	3,85
3	Средняя эквивалентная по поверхности крупность сырой окомкованной шихты, мм	3,28	3,57	3,30	3,14	2,65
4	Выход годного (по классу +5мм), %	87,5	85,3	86,0	85,5	88,2
5	Удельная производительность (по фр. + 5мм), т/(м ² ·ч)	1,366	1,300	1,420	1,490	1,296
6	Вертикальная скорость спекания, мм/мин	20,6	19,8	21,6	23,1	19,2
7	Барабанная проба, %:					
	- сопротивление годного агломерата удару (+5 мм)	75,3	74,5	75,2	77,9	77,6
	- разрушение годного агломерата (0,5-5 мм)	22,1	23,0	21,8	18,8	19,0
	- истирание годного агломерата (0-0,5 мм)	2,6	2,5	3,0	3,4	3,4
8	Расход известняка, кг/т	55,02	121,61	71,98	46,52	10,67
9	Химический состав агломерата, %:					
	Fe	60,99	56,83	61,46	63,84	61,86
	CaO	9,92	14,04	10,58	8,69	6,46
	SiO ₂	6,20	8,78	6,62	5,44	4,03
	MgO	1,75	1,61	1,13	1,08	4,70
	Al ₂ O ₃	1,47	0,41	0,48	0,49	1,69
	S	0,032	0,015	0,015	0,023	0,031
	P	0,017	0,010	0,009	0,010	0,039
MnO	0,17	0,04	0,04	0,06	0,44	

Наибольшая удельная производительность при использовании моноконцентратов достигалась в случае применения Лебединского концентрата ($УП_{+5} = 1,490 \text{ т}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$) и Михайловского флотационного концентрата ($УП_{+5} = 1,420 \text{ т}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$), в то время как при спекании шихт на основе Соколовского и Михайловского стандартного концентратов производительность установки оказывалась существенно ниже и составляла соответственно $1,366 \text{ т}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ и $1,300 \text{ т}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$. Полученные данные согласуются с параметрами окомкования аглошихты, так, средняя эквивалентная по поверхности крупность сырой окомкованной аглошихты монотонно росла при переходе от Михайловского стандартного к Соколовскому концентрату и далее к Лебединскому концентрату с $3,28 \text{ мм}$ до $3,30 \text{ мм}$ и далее до $3,57 \text{ мм}$ соответственно. Аналогичное соотношение наблюдалось для характеристик «холодной прочности» агломерата: наиболее высокое значение сопротивления удару агломерата из шихты на основе Лебединского концентрата ($СУ_{+5} = 77,9\%$), в то время как для агломератов на основе концентратов ССГПО и Михайловского стандартного эти значения составляли $75,3\%$ и $74,5\%$ соответственно.

Такое планомерное совместное повышение удельной производительности лабораторной установки и «холодной прочности» агломерата в направлении от Михайловского стандартного к Соколовскому и далее можно объяснить увеличением содержания железа в агломерате с $56,83\%$ для агломерата на основе Михайловского стандартного концентрата до $60,99\%$ для агломерата на основе концентрата ССГПО и далее до $63,84\%$ в агломерате на основе Лебединского концентрата. При этом одновременно падало содержание суммы оксидов ($\text{CaO} + \text{SiO}_2 + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3$) в агломерате с $24,84\%$ (Михайловский концентрат) до $19,34\%$ (концентрат ССГПО) и далее до $15,70\%$ (Лебединский концентрат). В результате росло содержание ферритной связки взамен силикатного стекла, что нашло выражение в увеличении прочностных характеристик агломерата.

Агломераты на основе Лебединского и Ковдорского концентратов имеют повышенную прочность к ударным воздействиям ($СУ_{+5} = 77,9\%$ и $77,6\%$ соответственно), однако при этом повышена также истираемость агломерата ($И_{0,5} = 3,4\%$ для обоих агломератов). Остальные агломераты имеют более низкие значения сопротивления удару, находящиеся в интервале от $74,5\%$ до $75,3\%$, при

этом агломераты на основе Михайловского стандартного концентрата и концентрата ССГПО отличаются сниженной истираемостью ($I_{-0,5} = 2,5\%$ и $2,6\%$ соответственно).

Выход годного агломерата фр. +5 мм возрастал от 84,6% до 85,3% при переходе от Лебединского концентрата к Михайловскому стандартному концентрату и далее до 87,5% при переходе к концентрату ССГПО. Изменение выхода годного агломерата здесь следует за содержанием оксида магния в агломерате, которое растет от 1,08% для агломерата на основе Лебединского концентрата до 1,61% для агломерата на основе Михайловского стандартного концентрата и далее до 1,75% для агломерата на основе концентрата ССГПО. Оксид магния оказывает стабилизирующее воздействие на силикатную связку, переводя часть оксидов кремния стекловидной фазы связки, имеющей относительно низкую прочность, в более прочные магнезиально-железистые оливины. В результате при первичном дроблении аглоспека прочность агломерата росла, и выход годного агломерата увеличивался.

С точки зрения расхода известняка и коксовой мелочи минимальный расход этих ресурсов на агломерацию обеспечивают Ковдорский концентрат (расход известняка (РИ) = 10,67 кг/т, расход коксика (РК) = 43,729 кг/т) и Лебединский концентрат (РИ = 46,52 кг/т, РК = 44,261 кг/т). Михайловский стандартный концентрат, богатый кремнеземом, требует повышенное количество известняка на офлюсование (РИ = 121,61 кг/т) и повышенный расход коксовой мелочи на спекание (РК = 45,492 кг/т).

Таким образом, базовой шихтой, включающей моноконцентрат ССГПО и агломерационные руды, включающие 73,0% Михайловской и 27,0% Богословской, обеспечили получение агломерата на лабораторной установке с обеспечением следующих показателей агломерации и качества агломерата:

- Выход годного агломерата (по классу +5мм) – 87,5%;
- Удельная производительность (по классу + 5 мм) – 1,366 т/(м²·ч)
- Холодная прочность агломерата по следующим показателям:
 - сопротивление годного агломерата удару (+5 мм) – 75,3%;
 - разрушение годного агломерата (0,5-5 мм) – 22,1%;
 - истирание годного агломерата (0-0,5 мм) – 2,6%.

Замещение концентрата ССГПО на Михайловский сопровождалось снижением производительности лабораторной агломерационной установки на 4,5%, что подтверждено в условиях производства на фабрике № 5 ПАО «ММК».

Использование в составе аглошихты флотоконцентрата Михайловского ГОК взамен стандартного концентрата обеспечивает повышение следующих параметров агломерации на лабораторной установке:

- удельная производительность агломерационной установки – 9,2%;
- выход годного агломерата из его спёка – 0,8% (отн.);
- выход фракции +5 мм после испытания по ГОСТ 15137-77 – 0,9% (отн.).

3.1.2 Двойные и тройные смеси из концентратов Михайловского стандартного, Лебединского и ССГПО

Результаты экспериментальных спеканий агломерационных шихт с двойными и тройными смесями из концентратов Михайловского стандартного, Лебединского и ССГПО на основе базовой смеси аглоруд даны в табл. 3.2 и 3.3 и на рис. 3.1. Удельную производительность агломерационной установки ($УП_{+5}$), выход годного ($ВГ_{+5}$) и сопротивление годного агломерата удару ($СУ_{+5}$) для рассматриваемых концентратов можно определить по уравнениям (3.1)-(3.3), задающим аппроксимирующие поверхности к рис. 3.1, с величиной R^2 соответственно 0,80, 0,91 и 0,79. По критерию Фишера уравнения (3.1)-(3.3) адекватно отражают экспериментальные данные.

$$УП_{+5} = 1,33M + 1,37C + 1,47L + 0,0093MC - 0,036ML - 0,22CL + 3,01MCL \quad (3.1)$$

$$ВГ_{+5} = 85,60M + 86,75C + 84,88L - 11,60MC - 3,57ML - 11,77CL + 20,83MCL \quad (3.2)$$

$$СУ_{+5} = 75,41M + 75,58C + 76,86L + 18,99MC + 14,27ML + 13,13CL - 27,89MCL, \quad (3.3)$$

где M , C и L – доля (от 0 до 1) концентратов Михайловского стандартного, Соколовского и Лебединского соответственно.

Таблица 3.2

Параметры окомкования, показатели агломерационного процесса и качества агломерата для шихт на основе двойных смесей из Соколовского, Михайловского стандартного и Лебединского концентратов

№ п/п	Показатели	Михайловский/ССГПО			Лебединский/Михайловский			Лебединский/ССГПО		
		25/75	50/50	75/25	25/75	50/50	75/25	25/75	50/50	75/25
1.	Оптимальная влажность шихты, %	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,0	8,5	8,0	8,0
2	Средневзвешенная крупность сырой окомкованной шихты, мм	4,30	4,85	5,03	4,64	4,46	3,90	4,33	4,26	4,08
3	Средняя эквивалентная по поверхности крупность сырой окомкованной шихты, мм	3,22	4,00	4,14	3,75	3,54	2,75	3,28	3,25	3,01
4	Выход годного (по классу +5мм), %	83,8	83,4	84,0	85,0	84,4	84,1	82,0	83,2	83,9
5	Удельная производительность (по классу + 5 мм), т/(м ² ·ч)	1,360	1,342	1,337	1,360	1,400	1,408	1,369	1,375	1,380
6	Вертикальная скорость спекания, мм/мин	21,4	21,2	21,0	21,1	21,9	22,1	22,0	21,8	21,7
7	Барабанная проба, %:									
	- сопротивление годного агломерата удару (+5 мм)	78,9	80,1	79,3	80,0	79,4	78,0	79,2	79,5	78,3
	- разрушение годного агломерата (0,5-5 мм)	18,0	16,6	17,1	17,1	17,7	19,2	17,8	17,5	18,8
	- истирание годного агломерата (0-0,5 мм)	3,1	3,3	3,6	3,0	3,1	2,8	3,0	3,0	2,9
8	Расход известняка, кг/т	72,69	89,54	105,82	104,15	85,30	66,26	53,11	50,46	48,44
9	Химический состав агломерата, %:									
	Fe	59,90	58,84	57,83	58,51	60,31	62,02	61,69	62,43	63,14
	CaO	11,00	12,04	13,05	12,76	11,28	10,07	9,62	9,28	8,97
	SiO ₂	6,88	7,52	8,16	7,98	7,05	6,31	6,00	5,81	5,61
	MgO	1,71	1,69	1,64	1,49	1,40	1,22	1,59	1,43	1,25
	Al ₂ O ₃	1,19	0,93	0,67	0,44	0,56	0,46	1,23	0,99	0,74
	S	0,027	0,024	0,019	0,017	0,019	0,020	0,030	0,028	0,025
	P	0,016	0,014	0,013	0,011	0,012	0,011	0,015	0,014	0,012
	MnO	0,14	0,10	0,07	0,04	0,06	0,06	0,14	0,12	0,09

Таблица 3.3

Параметры окомкования, показатели агломерационного процесса и качества агломерата для шихт на основе тройных смесей из Соколовского, Михайловского стандартного и Лебединского концентратов

№ п/п	Показатели	Состав смеси			
		Лебединский/Михайловский/ССГПО			
		50/25/25	25/50/25	25/25/50	33/33/33
1	Оптимальная влажность шихты, %	8,5	8,0	8,0	8,0
2	Средневзвешенная крупность сырой окомкованной шихты, мм	4,36	4,51	4,03	4,13
3	Средняя эквивалентная по поверхности крупность сырой окомкованной шихты, мм	3,24	3,79	3,13	3,09
4	Выход годного (по классу +5мм), %	83,4	83,8	83,6	83,5
5	Удельная производительность (по классу + 5 мм), т/(м ² ·ч)	1,505	1,428	1,433	1,465
6	Вертикальная скорость спекания, мм/мин	23,8	22,5	22,6	23,2
7	Барабанная проба, %:				
	- сопротивление годного агломерата удару (+5 мм)	79,6	80,3	79,8	80,1
	- разрушение годного агломерата (0,5-5 мм)	17,3	17,0	17,4	16,9
	- истирание годного агломерата (0-0,5 мм)	3,1	2,7	2,8	3,0
8	Расход известняка, кг/т	68,80	87,74	70,07	75,64
9	Химический состав агломерата, %:				
	Fe	61,29	59,53	60,62	60,46
	CaO	10,41	11,75	10,68	10,97
	SiO ₂	6,50	7,33	6,67	6,85
	MgO	1,40	1,52	1,55	1,49
	Al ₂ O ₃	0,71	0,69	0,95	0,78
	S	0,023	0,021	0,025	0,023
	P	0,013	0,012	0,014	0,013
MnO	0,08	0,08	0,11	0,09	

Согласно табл. 3.2, повышенную крупность агломерационной шихты обеспечивает Михайловский стандартный концентрат, в то время как Лебединский концентрат обуславливает снижение крупности гранул. Так, сырая окомкованная шихта, содержащая 75% Михайловского стандартного концентрата и 25% концентрата ССГПО, имела максимальную в серии среднюю эквивалентную по поверхности крупность, равную 4,14 мм, в то время как шихта из Лебединского и Соколовского концентратов, богатая Лебединским концентратом (75/25 Лебединский/ССГПО) имела минимальную в серии среднюю эквивалентную по поверхности крупность, составившую 2,75 мм.

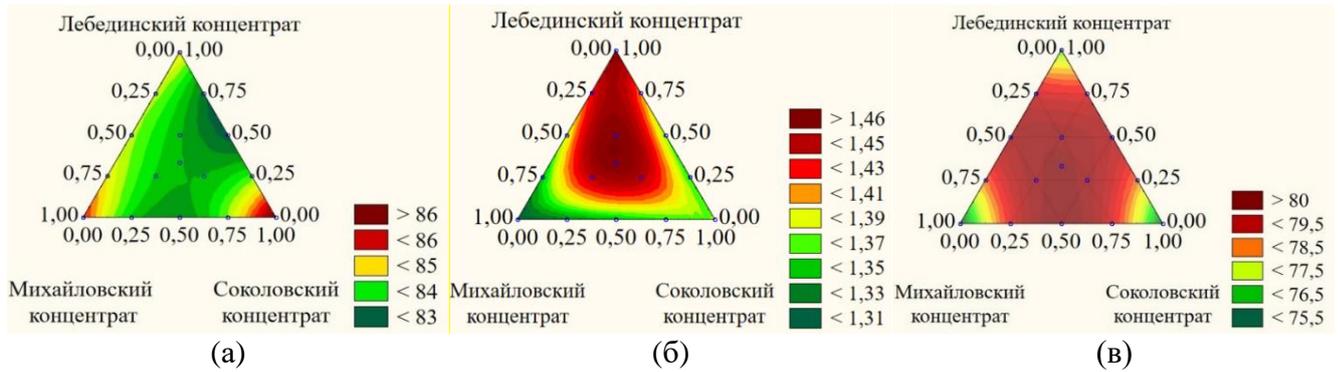


Рисунок 3.1 – Выход годного агломерата класса +5 мм, %, (а), удельная производительность агломерационной установки по годному агломерату, т/(м²·ч), (б), сопротивление годного агломерата удару, по содержанию фракции +5 мм после испытания в трубе, %, (в), для шихт на основе смесей Михайловского стандартного, Лебединского и Соколовского концентратов

Ухудшение условий окомкования при введении Лебединского концентрата объясняется его тонким гранулометрическим составом (табл. 2.4) и повышением доли тонких концентратов, по сравнению с шихтами на основе Михайловского стандартного концентрата, за счет известняка, которого на офлюсование Лебединского концентрата требуется меньше.

При попарном составлении бинарных смесей изученных концентратов во всех случаях наблюдалось снижение выхода годного агломерата, по сравнению с моноконцентратами. Наиболее низкий выход годного в интервале от 82,0 до 83,2% был получен для бинарных смесей на основе Лебединского (50-75%) и Соколовского (25-50%) концентратов. Наиболее высокий выход годного для двойных смесей, находящийся на уровне от 84,1% до 85,0%, получили при смешивании Михайловского стандартного и Лебединского концентратов в разных соотношениях.

Повышенную удельную производительность в серии демонстрировали тройные смеси с содержанием Лебединского концентрата от 25 до 100%, Михайловского стандартного концентрата – от 0 до 50% и Соколовского концентрата – от 0 до 50%. Максимальную производительность лабораторной установки на линии Михайловский стандартный – Лебединский концентрационного треугольника обеспечивал моноконцентрат Лебединского ГОК (1,490 т/(м²·ч)), при этом обеспечение удельной производительности лабораторной установки на уровне выше базового (то есть моноконцентрата Соколовского ГОК), от 1,400 до 1,490 т/(м²·ч)),

позволяли бинарные смеси с содержанием Лебединского концентрата от 50 до 100% соответственно.

Наиболее высокие прочностные характеристики агломерата в холодном состоянии ($СУ_{+5} = 80,3\%$) обеспечивала смесь концентратов Лебединский/Михайловский стандартный/ССГПО 25/50/25. На стороне Михайловский-Лебединский концентрационного треугольника наблюдался максимум прочности ($СУ_{+5} = 80,0\%$), отвечающий смеси концентратов Михайловского и Лебединского в соотношении 75/25.

Наблюдаемый рост прочностных характеристик агломерата при попарном смешивании любых концентратов находит объяснение при совместном рассмотрении химического и гранулометрического составов концентратов. Так, Лебединский концентрат имеет повышенное содержание железа (69,3%) и относительно низкое содержание оксида магния (0,32%). Михайловский концентрат также имеет низкое содержание оксида магния (0,28%), однако требует для офлюсования значительного количества известняка, который содержит в своем составе доломит ($MgO_{изв} = 5,23\%$), поэтому повышает содержание оксида магния в агломерате. При смешении бедного по магнезии Лебединского концентрата с магнезиальным концентратом ССГПО ($MgO = 1,15\%$) происходит оптимизация по содержанию данного оксида, и в итоге агломерат на основе смесей данных концентратов характеризуется повышенным сопротивлением удару. Аналогичная ситуация имеет место при смешении Лебединского и Михайловского стандартного концентратов. С точки зрения вклада в крупность сухой шихты Лебединский концентрат является самым тонким концентратом, в то время как концентрат ССГПО имеет повышенную крупность, а концентрат Михайловский стандартный требует для офлюсования повышенных количеств известняка, имеющего относительно высокую крупность частиц (табл. 2.4 и 2.6). Смешение Лебединского концентрата с концентратом ССГПО приводит к оптимизации сухой шихты по крупности, в результате чего происходит и улучшение гранулометрического состава сырой окомкованной шихты (табл. 3.2). В результате в парах концентратов Лебединский/Михайловский стандартный и

Лебединский/ССГПО наблюдается повышение удельной производительности лабораторной установки.

Таким образом, совместный анализ изменений показателей агломерационного процесса и качества получаемого агломерата в зависимости от состава двойных и тройных смесей позволил выявить следующие возможные рациональные концентраты и их смеси:

1. 70% Михайловского и 30% Лебединского концентратов. В условиях сохранения доли аглоруд на уровне 19,0%, включающую 73% Михайловскую и 27% Богословскую, спекание такой шихты обеспечивало изменение показателей агломерации в лабораторных условиях:

- производительность агломерационной установки выросла на 4,6%;
- выход годного агломерата (по классу +5мм) уменьшился на 0,5% отн.;
- выход фракции +5 мм после испытания по ГОСТ 15137-77 увеличился на 7,2% (отн.).

2. Моноконцентрат Лебединского ГОК. Переход от смеси концентратов 70% Михайловского и 30% Лебединского на 100% Лебединского концентрата обеспечил изменение следующих параметров агломерации на лабораторной установке:

- повышение удельной производительности агломерационной установки на 9,0%;
- снижение выхода фракции +5 мм после испытания по ГОСТ 15137-77 на 1,1% (отн.);
- уменьшение выхода годного агломерата из его спёка на 0,34% отн.

3. Смесь, содержащая Лебединский и Михайловский стандартный концентраты в соотношении 50/50, обеспечивает максимальную для данной пары концентратов удельную производительность лабораторной аглоустановки по годному агломерату (1,505 т/(м²·ч) при относительно высоком выходе годного агломерата, равном 85,5% и прочностными характеристиками спека на уровне, равном $SU_{+5} = 75,7\%$. Замена стандартного Михайловского концентрата на флотационный для данной смеси обеспечивает изменение следующих параметров агломерации на лабораторной установке:

- повышение удельной производительности агломерационной установки – 9,1%;
- увеличение выхода годного агломерата из его спёка – 1,3% (отн.);
- снижение выхода фр. +5 мм после испытания по ГОСТ 15137 – 4,7% (отн)

3.1.3. Двойные и тройные смеси из концентратов Михайловского флотационного, Лебединского и ССГПО

Результаты экспериментальных спеканий агломерационных шихт с двойными и тройными смесями из концентратов Михайловского стандартного, Лебединского и ССГПО на основе базовой смеси аглоруд даны в табл. 3.4 и 3.5 и на рис. 3.2. Удельную производительность агломерационной установки ($УП_{+5}$), выход годного ($ВГ_{+5}$) и сопротивление годного агломерата удару ($СУ_{+5}$) для рассматриваемых концентратов можно определить по уравнениям (3.4)-(3.6), описывающим аппроксимирующие поверхности к рис. 3.2, с величиной R^2 соответственно 0,92, 0,87 и 0,97. По критерию Фишера уравнения (3.4)-(3.6) адекватно отражают экспериментальные данные.

$$УП_{+5} = 1,42Mф + 1,38C + 1,47Л - 0,057MфC + 0,23MфЛ - 0,23CЛ + 3,04MфCЛ \quad (3.4)$$

$$ВГ_{+5} = 86,65Mф + 86,63C + 85,73Л - 9,87MфC - 3,119MфЛ - 12,85CЛ + 6,82MфCЛ \quad (3.5)$$

$$СУ_{+5} = 75,26Mф + 75,56C + 77,54Л + 1,23MфC - 2,97MфЛ + 13,09CЛ - 18,97MфCЛ, \quad (3.6)$$

где $Mф$, C и $Л$ – доля (от 0 до 1) концентратов Михайловского флотационного, Соколовского и Лебединского соответственно.

Как видно из табл. 3.4 и 3.5, максимальная средняя эквивалентная по поверхности крупность (3,94 мм), достигалась для смеси Лебединского, Михайловского флотационного и Соколовского концентратов, взятых в соотношении 25:25:50. Наименьшей средней эквивалентной по поверхности крупностью (2,10 мм) характеризовалась сырая окомкованная шихта на основе смеси Лебединского и Михайловского флотационного концентратов, взятых в соотношении 75:25.

Таблица 3.4

Параметры окомкования, показатели агломерационного процесса и качества агломерата для шихт на основе двойных смесей из Соколовского, Михайловского флотационного и Лебединского концентратов

№ п/п	Показатели	Михайловский флото /ССГПО			Лебединский/ Михайловский флото			Лебединский/ССГПО		
		25/75	50/50	75/25	25/75	50/50	75/25	25/75	50/50	75/25
1	Оптимальная влажность шихты, %	8,5	8,5	8,0	8,0	8,5	8,0	8,5	8,0	8,0
2	Средневзвешенная крупность сырой окомкованной шихты, мм	4,44	4,28	3,83	3,89	3,24	3,18	4,33	4,26	4,08
3	Средняя эквивалентная по поверхности крупность сырой окомкованной шихты, мм	3,69	3,06	2,83	2,70	2,22	2,10	3,27	3,27	3,01
4	Выход годного (по классу +5мм), %	84,2	83,8	85,9	85,9	85,5	84,9	82,0	83,2	83,9
5	Удельная производительность (по классу + 5 мм), т/(м ² ·ч)	1,380	1,385	1,500	1,493	1,505	1,500	1,369	1,375	1,380
6	Вертикальная скорость спекания, мм/мин	21,6	21,8	23,3	22,9	23,2	23,3	22,0	21,8	21,7
7	Барабанная проба, %:									
	- сопротивление годного агломерата удару (+5 мм)	75,6	75,9	76,2	75,3	75,7	76,2	79,2	79,5	78,3
	- разрушение годного агломерата (0,5-5 мм)	21,6	21,5	20,8	21,7	21,2	20,8	17,8	17,5	18,8
	- истирание годного агломерата (0-0,5 мм)	2,8	2,6	3,0	3,0	3,1	3,0	3,0	3,0	2,9
8	Расход известняка, кг/т	58,81	63,92	53,33	65,68	59,70	53,33	53,11	50,46	48,44
9	Химический состав агломерата, %:									
	Fe	61,13	61,21	61,33	62,04	62,63	63,22	61,69	62,43	63,14
	CaO	10,05	10,28	10,42	10,11	9,67	9,19	9,62	9,28	8,97
	SiO ₂	6,30	6,41	6,52	6,33	6,04	5,73	6,00	5,81	5,61
	MgO	1,60	1,45	1,30	1,13	1,11	1,09	1,59	1,43	1,25
	Al ₂ O ₃	1,22	0,98	0,72	0,48	0,49	0,49	1,23	0,99	0,74
	S	0,028	0,024	0,019	0,017	0,019	0,020	0,030	0,028	0,025
	P	0,015	0,013	0,011	0,009	0,010	0,010	0,015	0,014	0,012
	MnO	0,14	0,10	0,07	0,04	0,05	0,06	0,14	0,12	0,09

Таблица 3.5

Параметры окомкования, показатели агломерационного процесса и качества агломерата для шихт на основе тройных смесей из Соколовского, Михайловского флотационного и Лебединского концентратов

№ п/п	Показатели	Состав смеси Лебединский/Михайловский флото/ССГПО			
		50/25/25	25/50/25	25/25/50	33/33/33
1	Оптимальная влажность шихты, %	8,5	8,0	8,0	8,0
2	Средневзвешенная крупность сырой окомкованной шихты, мм	3,34	4,42	4,48	4,33
3	Средняя эквивалентная по поверхности крупность сырой окомкованной шихты, мм	3,51	3,73	3,94	3,56
4	Выход годного (по классу +5мм), %	84,0	84,8	83,0	83,5
5	Удельная производительность (по классу + 5 мм), т/(м ² ·ч)	1,530	1,515	1,510	1,520
6	Вертикальная скорость спекания, мм/мин	24,0	23,6	24,0	24,0
7	Барабанная проба, %:				
	- сопротивление годного агломерата удару (+5 мм)	77,3	76,2	76,5	76,8
	- разрушение годного агломерата (0,5-5 мм)	19,3	21,0	20,5	20,5
	- истирание годного агломерата (0-0,5 мм)	3,4	2,8	3,0	2,7
8	Расход известняка, кг/т	54,92	61,69	56,60	57,51
9	Химический состав агломерата, %:				
	Fe	62,54	61,93	61,85	62,11
	CaO	9,45	9,95	9,73	9,72
	SiO ₂	5,92	6,22	6,10	6,08
	MgO	1,27	1,28	1,44	1,32
	Al ₂ O ₃	0,74	0,73	0,98	0,81
	S	0,023	0,020	0,026	0,023
	P	0,012	0,011	0,013	0,012
	MnO	0,08	0,08	0,11	0,09

Увеличение содержания концентрата ССГПО в бинарных смесях концентратов Лебединский-ССГПО и Михайловский флотационный-ССГПО от 25% до 75% вело к монотонному росту средней эквивалентной по поверхности крупности гранул сырой окомкованной шихты с 3,01 мм до 3,27 мм и с 2,83 мм до 3,69 мм соответственно, по-видимому, в связи со снижением доли более тонких концентратов Лебединского и Михайловского флотационного. В то же время в двойной смеси концентратов Лебединский/Михайловский флотационный, шихты из которой имели относительно низкую среднюю эквивалентную по поверхности крупность, увеличение доли Лебединского концентрата приводило к дополнительному измельчению гранул шихты.

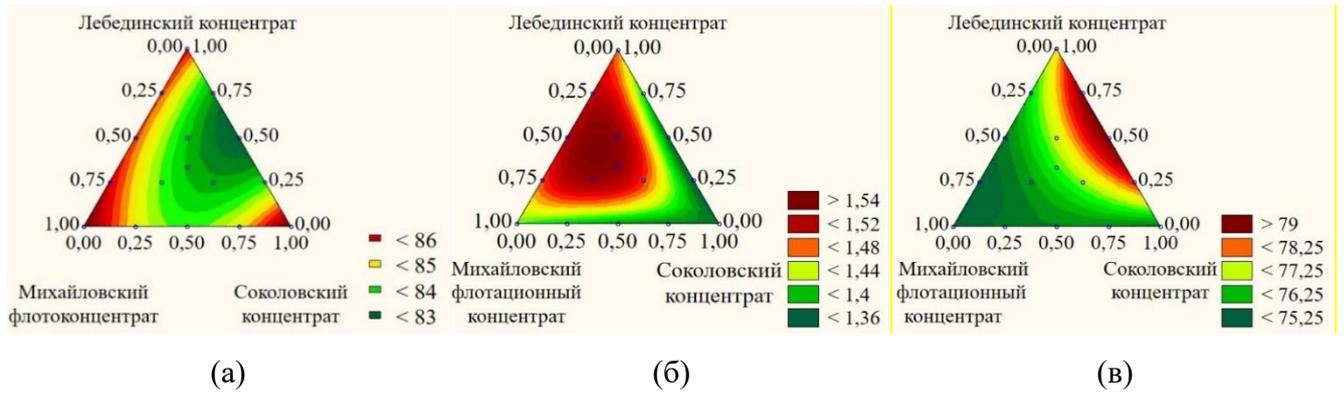


Рисунок 3.2 – Выход годного агломерата класса +5 мм, %, (а), удельная производительность агломерационной установки по годному агломерату, т/(м²·ч), (б), сопротивление годного агломерата удару, по содержанию фракции +5 мм после испытания в трубе, %, (в), для шихт на основе смесей Михайловского флотационного, Лебединского и Соколовского концентратов

Так, средняя эквивалентная по поверхности крупность сырой окомкованной шихты монотонно уменьшалась с 2,70 мм до 2,10 мм при увеличении доли Лебединского концентрата в двойной смеси Лебединский-Михайловский флотационный с 25% до 75%. В тройных смесях тенденция исследуемых концентратов к формированию гранул определенной крупности сохранялась: средняя эквивалентная по поверхности крупность сырой окомкованной шихты последовательно уменьшалась при увеличении доли Лебединского концентрата и снижении доли концентрата ССГПО в смеси с 3,94 мм для смеси, содержащей 50% концентрата ССГПО и по 25% Лебединского и Михайловского флотационного концентратов, до 3,51 мм для смеси, содержащей 50% Лебединского концентрата и по 25% концентратов ССГПО и Михайловского флотационного.

При введении концентрата ССГПО в состав двойной смеси из Михайловского флотационного и Лебединского концентратов происходило улучшение условий окомкования и повышение средней эквивалентной по поверхности крупности с 2,10-2,70 мм (двойные смеси) до 3,51-3,94 мм (тройные смеси). В результате росли вертикальная скорость спекания и удельная производительность агломерационной машины, несмотря на снижение содержания общего железа в агломерате с 62,0-63,2% до 61,9-62,5%, обусловленного использованием относительно бедного по железу концентрата ССГПО.

Изменение выхода годного агломерата в данной серии экспериментов, так же, как и в случае концентрационного треугольника Михайловский стандартный-ССГПО-Лебединский, подчинялось общей тенденции – снижению выхода годного агломерата при спекании смесей концентратов, по сравнению с моноконцентратами. Минимальное падение выхода годного агломерата (до уровня 85,9-86,1%) достигалось при использовании двойной смеси, содержащей 75% Михайловского флотационного концентрата, в то время как двойная смесь, содержащая 75% Соколовского концентрата, отличалась самым низким среди двойных смесей в данной серии выходом годного агломерата (83,1-84,2%). Относительно низким выход годного оставался для тройных смесей концентратов, находясь на уровне от 83,0% до 84,0%. Уровень выхода годного агломерата, максимально близкий к базовому значению (87,5%) в серии, достигался лишь при использовании моноконцентрата Михайловского флотационного ($B\Gamma_{+5} = 86,0\%$). Максимальная удельная производительность аглоустановки по годному агломерату, достигавшая 1,530 т/(м²·ч), была отмечена при спекании тройной смеси из Лебединского, Михайловского флотационного и Соколовского концентратов, взятых в соотношении 50/25/25. Все тройные смеси концентратов с содержанием каждого концентрата на уровне 25% или 50% позволили добиться повышенной удельной производительности аглоустановки по годному агломерату, которая для этих смесей находилась в интервале 1,510-1,530 т/(м²·ч). На стороне Лебединский-Михайловский флотационный концентрационного треугольника максимум удельной производительности аглоустановки по годному агломерату, составивший 1,505 т/(м²·ч), позволила получить смесь концентратов в равных долях. Несмотря на то, что все значения удельной производительности аглоустановки при спекании смесей концентратов, изучаемых в данной экспериментальной серии, превышали базовое значение, для двойных смесей из Лебединского и ССГПО концентратов в разных соотношениях удельная производительность аглоустановки оставалась относительно низкой, составляя от 1,369 т/(м²·ч) до 1,380 т/(м²·ч).

Наблюдаемое в данной экспериментальной серии повышение удельной производительности при использовании смесей, содержащих Лебединский и Михайловский флотационный концентраты, по-видимому, связано с увеличением содержания железа в агломерате и уменьшением содержания пустой породы. Как Лебединский, так и Михайловский флотационный концентраты имеют повышенное содержание железа (69,3% и 67,8% соответственно), что способствует повышению показателей спекания и прочностных характеристик агломерата. В то же время Лебединский и Михайловский флотационный концентраты содержат лишь относительно небольшие количества оксида магния (0,32% и 0,14% соответственно). Поскольку оба концентрата имеют низкое содержание SiO_2 , то на их офлюсование требовались лишь относительно небольшие количества известняка, богатого оксидом магния, и получаемый в результате агломерат оказывался беден по содержанию MgO (1,08% для случая 100% Лебединского концентрата и 1,13% для случая 100% Михайловского флотационного концентрата), в то время как в случае использования чистого концентрата ССГПО ($\text{MgO} = 1,15\%$) агломерат содержал 1,75% оксида магния. Оптимизация по содержанию оксида магния обуславливала систематический рост прочностных характеристик агломерата в направлении центра треугольника и середин сторон Михайловский флотационный-ССГПО и Лебединский-ССГПО. На стороне Лебединский-Михайловский флотационный подобная динамика изменения прочностных характеристик не отмечалась, а имело место монотонное возрастание прочностных характеристик агломерата с повышением содержания железа в нем.

Лучшие показатели прочности агломерата были получены при исключении из смеси Михайловского флотационного концентрата. В этом случае совместное действие фактора увеличения содержания железа в агломерате ($\text{Fe}_{\text{агл}} = 62,4\%$) за счет Лебединского концентрата и оптимизации по MgO ($\text{MgO}_{\text{агл}} = 1,43\%$) за счет смешивания богатого и бедного по этому оксиду концентратов позволило повысить сопротивление годного агломерата удару, вплоть до максимального в серии значения $\text{СУ}_{+5} = 79,7\%$, полученного для смеси из Лебединского и Соколовского концентратов, взятых в равных количествах. В то же время выход годного

агломерата на этой стороне треугольника падал, вплоть до минимального в серии значения $ВГ_{+5} = 82,0\%$. Это могло быть результатом формирования мелкопористой структуры агломерата, в то время как в случае смесей Михайловский флотационный-Лебединский, отличающихся сниженным количеством пустой породы и, как следствие, улучшенными тепловыми условиями, формировался монолит, дающий при барабанном испытании повышенное количество мелочи в результате раскалывания напряженных кусков.

Таким образом, проведенные спекания позволили выявить следующие рациональные составы шихт, обеспечивающие повышенные показатели спекания и качества полученного агломерата. Смесь, содержащая Лебединский и Михайловский флотационный концентраты в соотношении 50/50, обеспечивает максимальную для данной пары концентратов удельную производительность лабораторной аглоустановки по годному агломерату ($1,505 \text{ т}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$) при относительно высоком выходе годного агломерата, равном $85,5\%$, и прочностных характеристиках спека на уровне, равном $СУ_{+5} = 75,7\%$).

Для смеси, содержащей Лебединский и Михайловский концентраты в соотношении 50/50, замена стандартного Михайловского концентрата на флотационный обеспечивает изменение следующих параметров агломерации на лабораторной установке:

- повышение удельной производительности агломерационной установки – $9,1\%$;
- увеличение выхода годного агломерата из его спёка – $1,3\%$ (отн.);
- уменьшение выхода фракции $+5 \text{ мм}$ после испытания по ГОСТ 15137-77 – $4,7\%$ (отн.).

3.2 Агломерация шихт с различными видами руд

3.2.1 Результаты спеканий шихт из агломерационных руд Михайловского, Богословского и Стойленского ГОКов на основе Михайловского стандартного концентрата

При спеканиях шихт с различными аглорудами и их смесями на основе Михайловского стандартного концентрата за базовую смесь аглоруд принимали состав, включающий 73% Михайловской аглоруды и 27% Богословской аглоруды.

Моноаглоруды. Результаты окомкования аглошихт, показатели агломерации и качества агломерата для шихт с индивидуальными аглорудами на основе Михайловского стандартного концентрата приведены в табл. 3.6. Крупность сырой окомкованной шихты при замене аглоруд в данной экспериментальной серии определялась содержанием в руде крупной фракции 3-8 мм, как видно из табл. 2.10. При повышении содержания фракции 3-8 мм в руде от 25,2% для Михайловской до 29,0% для Богословской и далее до 50% для Стойленской средняя эквивалентная по поверхности крупность монотонно возрастала с 3,40 мм до 4,10 мм и далее до 4,45 мм для шихт с соответствующими аглорудами (табл. 3.6).

Согласно табл. 3.5, наибольшие удельную производительность лабораторной агломерационной установки по годному агломерату ($УП_{+5} = 1,388 \text{ т}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$), выход годного агломерата ($ВГ_{+5} = 85,0\%$) и сопротивление годного агломерата удару ($СУ_{+5} = 76,5\%$) при относительно высоком содержании железа (58,1%) обеспечивало использование 100% Стойленской аглоруды. Использование Михайловской руды требовало повышение расхода известняка и кокса с последующим снижением основных показателей спекания и качества агломерата относительно других исследуемых в серии руд. В то же время измельчение гранул сырой окомкованной шихты при использовании в составе шихты Михайловской агломерационной руды обеспечивало более полное проплавление зерен и формирование меньшего количества мелочи 0-0,5 мм (2,4%) после испытания «холодной прочности» по ГОСТ 15137-77, по сравнению с другими исследуемыми аглорудами.

Таблица 3.6

Параметры окомкования, показатели агломерационного процесса и качества агломерата для шихт на основе моноаглоруд и Михайловского стандартного концентрата

№ п/п	Показатели	Михайловская аглоруда	Богословская аглоруда	Стойленская аглоруда
1	Оптимальная влажность шихты, %	8,0	8,0	8,0
2	Средневзвешенная крупность сырой окомкованной шихты, мм	4,51	5,11	5,41
3	Средняя эквивалентная по поверхности крупность сырой окомкованной шихты, мм	3,40	4,10	4,45
4	Выход годного (по классу +5мм), %	83,5	84,5	85,0
5	Удельная производительность (по классу + 5 мм), т/(м ² ·ч)	1,355	1,364	1,388
6	Вертикальная скорость спекания, мм/мин	21,4	21,2	21,5
7	Барабанная проба, %:			
	- сопротивление годного агломерата удару (+5 мм)	73,9	76,0	76,5
	- разрушение годного агломерата (0,5-5 мм)	23,6	21,5	20,5
	- истирание годного агломерата (0-0,5 мм)	2,5	2,5	3,0
8	Расход известняка, кг/т	132,47	91,78	112,12
9	Химический состав агломерата, %:			
	Fe	56,33	58,21	58,07
	CaO	14,49	12,82	13,03
	SiO ₂	9,06	8,03	8,15
	MgO	1,62	1,50	1,52
	Al ₂ O ₃	0,34	0,59	0,59
	S	0,007	0,038	0,009
	P	0,011	0,011	0,018
	MnO	0,03	0,06	0,03

Двойные и тройные смеси из руд Михайловского, Богословского и Стойленского ГОКов.

Результаты экспериментальных спеканий агломерационных шихт с двойными и тройными смесями агломерационных руд на основе Михайловского стандартного концентрата приведены в табл. 3.7 и 3.8 и на рис. 3.3. Удельную производительность агломерационной установки (УП+5), выход годного (ВГ+5) и сопротивление годного агломерата удару (СУ+5) для рассматриваемых концентратов можно определить по уравнениям (3.7)-(3.9), описывающим аппроксимирующие поверхности к рис. 3.3, с величиной R^2 соответственно 0,78, 0,74 и 0,82. По критерию Фишера уравнения (3.7)-(3.9) адекватно отражают экспериментальные данные.

$$\text{УП}_{+5} = 1,29M + 1,32B + 1,36C - 0,0082MB + 0,031MC - 0,16BC + 0,74MBC \quad (3.7)$$

$$\text{ВГ}_{+5} = 83,92M + 84,13B + 85,04C + 3,98MB + 5,58MC + 4,81BC - 2,58MBC \quad (3.8)$$

$$\text{СУ}_{+5} = 73,77M + 76,02B + 76,85C - 0,086MB + 5,06MC + 2,17BC + 4,64MBC, \quad (3.9)$$

где: M , B и C – доля агломерационных руд соответственно Михайловского, Богословского и Стойленского месторождений, от 0 до 1.

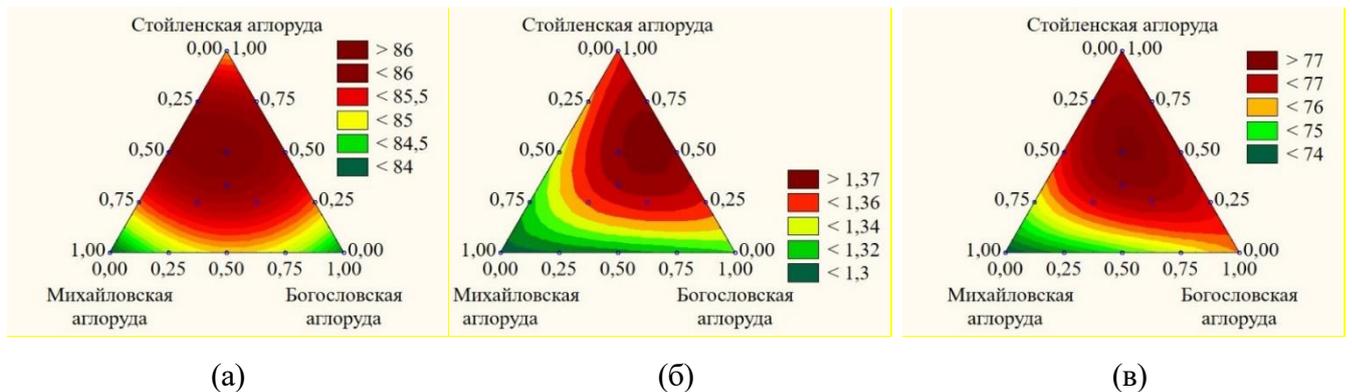


Рисунок 3.3 – Выход годного агломерата класса +5 мм, %, (а), удельная производительность агломерационной установки по годному агломерату, $t/(m^2 \cdot ч)$, (б), сопротивление годного агломерата удару, по содержанию фракции +5 мм после испытания в трубе, %, (в), для шихт на основе 100% Михайловского стандартного концентрата, Михайловской, Богословской и Стойленской аглоруд и их смесей

Таблица 3.7

Параметры окомкования, показатели агломерационного процесса и качества агломерата для шихт на основе двойных смесей аглоруд и Михайловского стандартного концентрата

№ п/п	Показатели	Стойленская/ Михайловская			Стойленская/ Богословская			Богословская/ Михайловская		
		25/75	50/50	75/25	25/75	50/50	75/25	25/75	50/50	75/25
1	Оптимальная влажность шихты, %	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
2	Средневзвешенная крупность сырой окомкованной шихты, мм	4,71	4,90	5,12	5,20	5,27	5,35	4,64	4,70	4,88
3	Средняя эквивалентная по поверхности крупность сырой окомкованной шихты, мм	3,65	3,89	4,16	4,18	4,26	4,35	3,75	3,81	3,95
4	Выход годного (по классу +5мм), %	85,6	85,8	85,4	84,9	85,8	86,1	85,3	84,8	84,7
5	Удельная производительность (по классу + 5 мм), т/(м ² ·ч)	1,319	1,328	1,349	1,348	1,377	1,385	1,300	1,309	1,319
6	Вертикальная скорость спекания, мм/мин	20,7	20,4	20,9	20,9	21,2	21,3	20,4	20,4	20,6
7	Барабанная проба, %:									
	- сопротивление годного агломерата удару (+5 мм)	75,5	76,5	77,0	76,3	76,7	77,6	74,4	74,5	76,2
	- разрушение годного агломерата (0,5-5 мм)	21,4	20,5	20,2	21,2	20,8	19,9	22,8	22,7	21,1
	- истирание годного агломерата (0-0,5 мм)	3,1	3,0	2,8	2,5	2,5	2,5	2,8	2,8	2,7
8	Расход известняка, кг/т	117,03	122,43	127,84	107,37	122,43	97,24	102,30	113,21	122,79
9	Химический состав агломерата, %:									
	Fe	57,64	57,19	56,76	58,08	57,19	58,17	57,73	57,23	56,80
	CaO	13,38	13,77	14,15	12,99	13,77	12,90	13,25	13,71	14,09
	SiO ₂	8,37	8,61	8,82	8,11	8,61	8,06	8,30	8,55	8,80
	MgO	1,55	1,57	1,61	1,51	1,57	1,50	1,54	1,56	1,61
	Al ₂ O ₃	0,53	0,46	0,41	0,60	0,46	0,60	0,53	0,46	0,40
	S	0,008	0,008	0,007	0,016	0,008	0,030	0,029	0,022	0,014
	P	0,016	0,014	0,012	0,016	0,014	0,012	0,010	0,011	0,010
	MnO	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,05	0,05	0,05	0,04

Таблица 3.8

Параметры окомкования, показатели агломерационного процесса и качества агломерата для шихт на основе тройных смесей аглоруд и Михайловского стандартного концентрата

№ п/п	Показатели	Состав смеси аглоруд			
		Стойленская/Богословская/Михайловская			
		50/25/25	25/50/25	25/25/50	33/33/33
1	Оптимальная влажность шихты, %	8,0	8,0	8,0	8,0
2	Средневзвешенная крупность сырой окомкованной шихты, мм	5,19	4,94	4,82	5,08
3	Средняя эквивалентная по поверхности крупность сырой окомкованной шихты, мм	4,20	3,99	3,85	4,10
4	Выход годного (по классу +5мм), %	86,4	85,1	85,7	86,0
5	Удельная производительность (по классу + 5 мм), т/(м ² ·ч)	1,406	1,346	1,321	1,394
6	Вертикальная скорость спекания, мм/мин	21,5	20,9	20,5	21,4
7	Барабанная проба, %:				
	- сопротивление годного агломерата удару (+5 мм)	78,4	76,5	76,0	77,5
	- разрушение годного агломерата (0,5-5 мм)	19,3	20,8	21,1	20,1
	- истирание годного агломерата (0-0,5 мм)	2,3	2,7	2,9	2,4
8	Расход известняка, кг/т	117,29	107,06	112,35	112,17
9	Химический состав агломерата, %:				
	Fe	57,24	57,71	57,66	57,54
	CaO	13,69	13,28	13,34	13,45
	SiO ₂	8,58	8,31	8,34	8,42
	MgO	1,57	1,53	1,54	1,54
	Al ₂ O ₃	0,47	0,53	0,53	0,50
	S	0,015	0,023	0,015	0,017
	P	0,012	0,012	0,013	0,013
	MnO	0,04	0,04	0,04	0,04

В бинарных смесях аглоруд крупность получаемой сырой окомкованной шихты монотонно возрастала с увеличением доли той руды, которая включала большее количество крупной фракции 3-8 мм (табл. 2.10). Так, в двойной смеси аглоруд Стойленская/Михайловская увеличение доли наиболее крупной Стойленской руды, содержащей 50% фракции 3-8 мм, с 25% до 50% и далее

до 75% приводило к последовательному увеличению средней эквивалентной по поверхности крупности сырой окомкованной шихты с 3,65 мм до 3,89 мм и далее до 4,16 мм соответственно.

Измельчению гранул сырой окомкованной шихты во всех двойных смесях способствовало увеличение доли наиболее тонкой по фракционному составу Михайловской аглоруды, содержащей лишь 25,2% класса 3-8 мм. По влиянию на фракционный состав сырой окомкованной шихты Богословская аглоруда занимала промежуточное положение.

В тройных смесях аглоруд связь между изменением крупности сырой окомкованной шихты и доли класса 3-8 мм в исходной аглоруде, преобладающей в смеси, сохранялась. Так, при изменении преобладающей в тройной смеси аглоруды (содержащейся в ней в количестве 50%) с Михайловской на Богословскую и далее на Стойленскую средняя эквивалентная по поверхности крупность сырой окомкованной шихты увеличивалась с 3,85 мм до 3,99 мм и далее до 4,20 мм соответственно.

Таким образом, в целом во всех двойных и тройных смесях аглоруд введение Стойленской руды и увеличение ее доли способствовало укрупнению гранул сырой окомкованной шихты, а введение Михайловской аглоруды и увеличение ее доли – измельчению гранул сырой окомкованной шихты. Богословская аглоруда по отношению к размеру получаемых сырых окатышей занимала промежуточное положение.

Как видно из приведенных в табл. 3.7 и 3.8 данных, наиболее высокие показатели агломерационного процесса и качества получаемого агломерата были получены для тройной смеси, содержащей 50% Стойленской аглоруды и по 25% Михайловской и Богословской аглоруд. Так, изменение рудной смеси с базовой на

рациональную позволило повысить следующие показатели спекания и качества получаемого агломерата:

- Удельная производительность лабораторной агломерационной установки по годному агломерату (фракция +5 мм) выросла с 1,300 т/(м²·ч) до 1,406 т/(м²·ч) или на 8,2%;

- Выход годного агломерата (фракция +5 мм) увеличился с 85,3% до 86,4% или на 1,3% (отн.);

- Сопротивление годного агломерата удару по содержанию фракции +5 мм после испытания по ГОСТ 15137-77 увеличилось с 74,4% до 78,4% (на 5,4% (отн.)).

Повышение основных показателей спекания и качества получаемого агломерата при замене базовой смеси агломерационных руд на рациональную достигается в основном за счет улучшения условий окомкования. Так, средняя эквивалентная по поверхности крупность возрастала с 3,75 мм (базовая смесь аглоруд) до 4,20 мм (рациональная смесь аглоруд), в результате чего улучшалась газопроницаемость шихты и росла вертикальная скорость спекания, с 20,4 мм/мин до 21,5 мм/мин (на 5,4%) (табл. 3.7 и 3.8). Такое снижение продолжительности процесса спекания способствовало улучшению тепловых условий за счет сокращения количества просасываемого воздуха и более глубокому проплавлению гранул, что привело к повышению выхода годного агломерата и его сопротивления удару после испытания по ГОСТ 15137-77, а также снижению истираемости агломерата по содержанию фракции -0,5 мм после этого испытания с 2,8% для базовой смеси до 2,3% для рациональной смеси аглоруд.

3.2.2 Результаты спеканий шихт с аглорудами на основе Михайловского флотационного концентрата

Для выяснения рационального соотношения агломерационных руд для существующей сырьевой базы ПАО «ММК» на первом этапе исследования были подготовлены шихты с индивидуальными агломерационными рудами Михайловского и Стойленского ГОКов, Богословского РУ, а также местными

рудами Сосновского и Туканского месторождений на основе Михайловского флотационного концентрата. За базовую приняли смесь агломерационных руд, включающую 73,0% Михайловской аглоруды и 27,0% Богословской аглоруды. Полученные результаты позволили выявить три руды, шихты с которыми отличались лучшими в экспериментальной серии показателями агломерационного процесса и качества полученного агломерата. Эти руды в дальнейшем были использованы для составления смесей аглоруд и построения концентрационных треугольников (диаграмм типа состав-свойство).

Моноаглоруды. Результаты окомкования аглошихт, показатели агломерации и качества агломерата для шихт с индивидуальными аглорудами на основе Михайловского флотационного концентрата приведены в табл. 3.9. Согласно табл. 3.9, в случае использования индивидуальных аглоруд в шихтах со 100% Михайловским флотоконцентратом наибольшие средние эквивалентные по поверхности крупности сырой окомкованной шихты, составившие 4,21 мм и 3,81 мм, были получены для шихт на основе 100% Туканской и 100% Стойленской аглоруд соответственно. Наименьшей средней эквивалентной по поверхности крупности, равной 3,19 мм, характеризовалась сырая окомкованная шихта на основе 100% Михайловской аглоруды. Богословская и Сосновская аглоруды по влиянию на окомкование шихты занимали промежуточные положения среди исследуемых аглоруд, при этом лучшее окомкование достигалось при использовании Богословской аглоруды. Полученные результаты окомкования находятся в хорошем соответствии с возрастанием доли крупной фракции 3-8 мм в аглоруде с 25,2% для Михайловской аглоруды до 29,0-30,0% для Богословской и Сосновской руд и далее до 50,0% для Туканской и Стойленской аглоруд (табл. 2.10).

Таблица 3.9

Параметры окомкования, показатели агломерационного процесса и качества агломерата для шихт на основе моноаглоруд и Михайловского флотационного концентрата

№ п/п	Показатели	Михайловская	Богословская	Стойленская	Сосновская	Туканская
1	Оптимальная влажность шихты, %	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
2	Средневзвешенная крупность сырой окомкованной шихты, мм	4,25	4,81	5,06	4,40	5,56
3	Средняя эквивалентная по поверхности крупность сырой окомкованной шихты, мм	3,19	3,62	3,81	3,35	4,21
4	Выход годного (по классу +5 мм), %	84,1	85,5	86,0	84,5	80,5
5	Удельная производительность (по классу + 5 мм), т/(м ² ·ч)	1,386	1,458	1,466	1,337	1,361
6	Вертикальная скорость спекания, мм/мин	21,7	22,3	22,5	20,9	22,4
7	Барабанная проба, %:					
	- сопротивление годного агломерата удару (+5 мм)	75,0	78,1	79,0	76,3	76,5
	- разрушение годного агломерата (0,5-5 мм)	21,7	19,2	18,0	20,7	20,2
	- истирание годного агломерата (0-0,5 мм)	3,3	2,7	3,0	3,1	3,4
8	Расход известняка, кг/т	83,58	38,62	61,02	54,26	63,27
9	Химический состав агломерата, %:					
	Fe	60,90	63,03	62,83	61,92	62,37
	CaO	11,05	9,22	9,47	10,15	9,36
	SiO ₂	6,92	5,77	5,92	6,36	5,84
	MgO	1,16	1,01	1,04	1,15	0,93
	Al ₂ O ₃	0,40	0,67	0,67	0,90	0,61
	S	0,006	0,039	0,009	0,028	0,009
	P	0,010	0,009	0,017	0,010	0,031
	MnO	0,03	0,06	0,03	0,06	0,15

Рост крупности сырой окомкованной аглошихты при переходе от Михайловской к Богословской и далее к Стойленской аглоруде приводил к последовательному увеличению газопроницаемости слоя и вертикальной скорости спекания с 21,7 мм/мин для Михайловской аглоруды до 22,3 мм для Богословской аглоруды и далее до 22,5 мм для Стойленской аглоруды. В результате последовательно росли основные показатели агломерационного процесса и качества агломерата:

- Удельная производительность агломерационной машины по годному агломерату (фракция +5 мм) последовательно росла с 1,386 т/(м²·ч) для шихты на основе Михайловской аглоруды до 1,458 т/(м²·ч) для шихты на основе Богословской аглоруды и далее до 1,466 т/(м²·ч) для шихты на основе Стойленской аглоруды;

- Выход годного агломерата по классу +5 мм монотонно возрастал с 84,1% для шихты на основе Михайловской аглоруды до 85,5% для шихты на основе Богословской аглоруды и далее до 86,0% для шихты на основе Стойленской аглоруды;

- Сопротивление годного агломерата удару по содержанию класса +5 мм после испытания по ГОСТ 15137-77 увеличивалось от 75,0% для шихты на основе Михайловской аглоруды до 78,1% для шихты на основе Богословской аглоруды и далее до 79,0% для шихты на основе Стойленской аглоруды.

Поскольку агломерат на основе Богословской аглоруды содержал наибольшее в серии количество железа (63,03%) и наименьшее количество пустой породы (табл. 3.9), он характеризовался наибольшей в серии стойкостью к истирающим воздействиям. Так, истираемость для данного агломерата по содержанию класса -0,5 мм после испытания «холодной прочности» составила 2,7% против 3,0-3,4% для агломератов, произведенных из остальных исследуемых агломерационных руд. В то же время агломерат из шихт на основе Богословской и Сосновской аглоруд имел повышенные содержания серы, 0,039% и 0,028% соответственно, против 0,006-0,009% в случае использования в шихте других аглоруд.

В случае Туканской аглоруды наблюдали эффективное окомкование шихты, так, средняя эквивалентная по поверхности крупность сырой окомкованной шихты составила 4,21 мм, достигнув максимального в серии значения. В результате обеспечивалась хорошая исходная газопроницаемость слоя шихтовых материалов, и спекание завершалось быстро. Вертикальная скорость спекания составляла 22,4 мм/мин, превышая базовое значение в 22,1 мм/мин на 1,4%. В то же время дополнительные затраты тепла на разложение основного рудообразующего минерала гидрогётита обусловили снижение теплового уровня процесса и, как следствие, падение выхода годного агломерата с 84,9% (база) до 80,5% (Туканская аглоруда).

В результате удельная производительность аглоустановки по годному агломерату класса +5 мм снизилась с 1,420 т/(м²·ч) (база) до 1,361 т/(м²·ч) (Туканская аглоруда). Недостаток тепла приводил к формированию значительных количеств непропеченного материала, и истирание агломерата после испытания «холодной прочности» составило 3,4%, что стало максимальным в серии значением данного показателя.

Шихта на основе Сосновской агломерационной руды при средних в серии показателях окомкования показала самую низкую вертикальную скорость спекания (20,9 мм). В результате, несмотря на то что выход годного агломерата (84,5%) оказался близким к базовому значению (84,9%), удельная производительность агломерационной машины по годному агломерату класса +5 мм составила лишь 1,337 т/(м²·ч), что стало самым низким значением по этому показателю в серии.

В результате проведенного анализа параметров агломерационного процесса и качества агломерата были выявлены три агломерационные руды, шихты с которыми обеспечивали наиболее высокие значения данных параметров. В результате на следующем этапе исследования перспектив рудной базы было принято решение продолжить эксперименты для составления треугольных диаграмм типа состав-свойство с двойными и тройными смесями на основе Михайловской, Богословской и Стойленской агломерационных руд.

Двойные и тройные смеси из руд Михайловского, Богословского и Стойленского ГОКов.

Результаты экспериментальных спеканий агломерационных шихт с двойными и тройными смесями агломерационных руд на основе Михайловского флотационного концентрата приведены в табл. 3.10 и 3.11 и на рис. 3.4. Удельную производительность агломерационной установки ($УП_{+5}$), выход годного ($ВГ_{+5}$) и сопротивление годного агломерата удару ($СУ_{+5}$) для рассматриваемых концентратов можно определить по уравнениям (3.10)-(3.12), описывающим аппроксимирующие поверхности к рис. 3.4, с величиной R^2 соответственно 0,65, 0,74 и 0,86. По критерию Фишера уравнения (3.10)-(3.12) адекватно отражают экспериментальные данные.

$$УП_{+5} = 1,39M + 1,45B + 1,47C + 0,053MB + 0,22MC + 0,14BC + 0,062MBC \quad (3.10)$$

$$ВГ_{+5} = 84,24M + 85,01B + 86,05C + 4,32MB + 3,89MC + 3,32BC - 7,34MBC \quad (3.11)$$

$$СУ_{+5} = 74,52M + 77,99B + 79,41C + 1,33MB + 5,87MC + 2,84BC + 35,61MBC, \quad (3.12)$$

где: M , B и C – доля агломерационных руд соответственно Михайловского, Богословского и Стойленского месторождений (от 0 до 1).

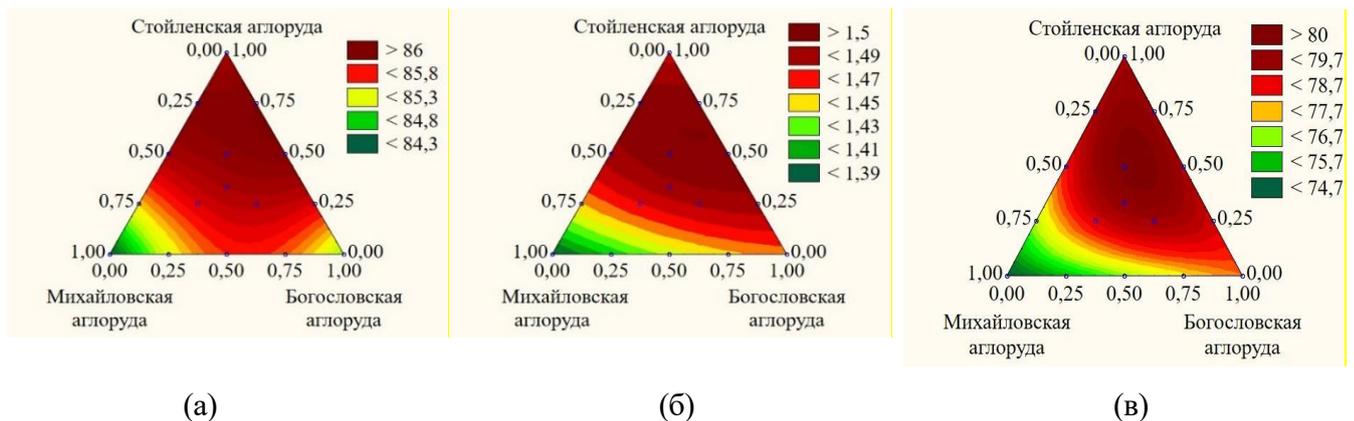


Рисунок 3.4 – Выход годного агломерата класса +5 мм, %, (а), удельная производительность агломерационной установки по годному агломерату, $t/(m^2 \cdot ч)$, (б), сопротивление годного агломерата удару, по содержанию фракции +5 мм после испытания в трубе, %, (в), для шихт на основе 100% Михайловского флотационного концентрата, Михайловской, Богословской и Стойленской аглоруд и их смесей

Параметры окомкования, показатели агломерационного процесса и качества агломерата для шихт на основе двойных смесей аглоруд и Михайловского флотационного концентрата

№ п/п	Показатели	Стойленская/ Михайловская			Стойленская/ Богословская			Богословская/ Михайловская		
		25/75	50/50	75/25	25/75	50/50	75/25	25/75	50/50	75/25
1	Оптимальная влажность шихты, %	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
2	Средневзвешенная крупность сырой окомкованной шихты, мм	4,44	4,67	4,84	4,85	4,89	4,96	4,42	4,59	4,66
3	Средняя эквивалентная по поверхности крупность сырой окомкованной шихты, мм	3,31	3,48	3,64	3,66	3,70	3,75	3,30	3,45	3,52
4	Выход годного (по классу +5мм), %	85,0	86,5	86,1	86,0	86,2	86,4	86,0	85,5	85,4
5	Удельная производительность (по классу + 5 мм), т/(м ² ·ч)	1,459	1,480	1,490	1,480	1,486	1,502	1,419	1,442	1,451
6	Вертикальная скорость спекания, мм/мин	22,6	22,7	22,8	22,7	22,8	22,9	22,1	22,4	22,5
7	Барабанная проба, %:									
	- сопротивление годного агломерата удару (+5 мм)	76,5	78,6	79,4	78,5	79,2	80,0	75,1	77,2	77,5
	- разрушение годного агломерата (0,5-5 мм)	20,6	19,0	18,1	19,1	18,6	17,7	22,2	20,2	19,9
	- истирание годного агломерата (0-0,5 мм)	2,9	2,4	2,5	2,4	2,2	2,3	2,7	2,6	2,6
8	Расход известняка, кг/т	77,90	72,82	66,64	44,58	49,90	55,76	73,21	61,91	50,38
9	Химический состав агломерата, %:									
	Fe	61,36	61,84	62,35	62,95	62,90	62,87	61,39	61,93	62,47
	CaO	10,67	10,29	9,85	9,29	9,34	9,41	10,63	10,17	9,69
	SiO ₂	6,68	6,43	6,16	5,81	5,85	5,87	6,64	6,37	6,06
	MgO	1,13	1,10	1,07	1,02	1,03	1,03	1,14	1,09	1,06
	Al ₂ O ₃	0,48	0,53	0,61	0,67	0,68	0,69	0,47	0,53	0,61
	S	0,006	0,008	0,007	0,031	0,024	0,016	0,014	0,023	0,030
	P	0,011	0,013	0,015	0,010	0,012	0,015	0,009	0,009	0,008
	MnO	0,03	0,03	0,03	0,05	0,05	0,04	0,04	0,05	0,05

Таблица 3.11

Параметры окомкования, показатели агломерационного процесса и качества агломерата для шихт на основе тройных смесей аглоруд и Михайловского флотационного концентрата

№ п/п	Показатели	Состав смеси аглоруд Стойленская/Богословская/Михайловская			
		50/25/25	25/50/25	25/25/50	33/33/33
1	Оптимальная влажность шихты, %	8,0	8,0	8,0	8,0
2	Средневзвешенная крупность сырой окомкованной шихты, мм	4,78	4,72	4,63	4,68
3	Средняя эквивалентная по поверхности крупность сырой окомкованной шихты, мм	3,61	3,56	3,46	3,53
4	Выход годного (по классу +5мм), %	87,0	85,6	85,5	86,2
5	Удельная производительность (по классу + 5 мм), т/(м ² ·ч)	1,550	1,461	1,460	1,512
6	Вертикальная скорость спекания, мм/мин	23,5	22,5	22,6	23,1
7	Барабанная проба, %:				
	- сопротивление годного агломерата удару (+5 мм)	80,9	79,0	77,6	80,5
	- разрушение годного агломерата (0,5-5 мм)	16,8	18,5	19,8	17,3
	- истирание годного агломерата (0-0,5 мм)	2,3	2,5	2,6	2,2
8	Расход известняка, кг/т	61,47	56,19	67,02	61,40
9	Химический состав агломерата, %:				
	Fe	62,38	62,19	61,52	62,24
	CaO	9,81	9,86	10,43	9,93
	SiO ₂	6,13	6,15	6,53	6,21
	MgO	1,07	1,08	1,12	1,07
	Al ₂ O ₃	0,61	0,64	0,56	0,58
	S	0,015	0,023	0,015	0,018
	P	0,012	0,010	0,011	0,012
	MnO	0,04	0,05	0,04	0,04

При увеличении доли Стойленской аглоруды в двойной смеси из Стойленской и Богословской аглоруд с 25% до 50% и далее до 75% происходил последовательный рост средней эквивалентной по поверхности крупности сырой окомкованной шихты с 3,66 мм до 3,70 мм и далее до 3,75 мм. Аналогичный рост средней эквивалентной по поверхности крупности сырой окомкованной шихты наблюдался для смесей из Стойленской и Михайловской руды при увеличении доли Стойленской руды. Так, повышение доли Стойленской руды в смеси с 25% до 50% и далее до 75% обуславливало монотонное повышение средней эквивалентной по поверхности крупности сырой окомкованной шихты с 3,31 мм до 3,48 мм и далее до 3,64 мм.

В смеси из Михайловской и Богословской аглоруд рост содержания Богословской руды с 25% до 50% и далее до 75% приводил к последовательному повышению средней эквивалентной по поверхности крупности сырой окомкованной шихты с 3,30 мм до 3,45 мм и далее до 3,52 мм.

В тройных смесях аглоруд тенденция, выявленная для бинарных смесей, сохранялась. Так, наиболее высокую для тройных смесей среднюю эквивалентную по поверхности крупность, равную 3,61 мм, имела шихта на основе смеси из Стойленской, Богословской и Михайловской аглоруд, взятых в соотношении 50/25/25, то есть смесь с преобладанием Стойленской аглоруды, отличающейся повышенной крупностью.

Шихта с преобладанием Михайловской аглоруды (25/25/50) имела наименьшую для тройных смесей среднюю эквивалентную по поверхности крупность, равную 3,46 мм, в то время как шихты на основе тройной смеси аглоруд с преобладанием Богословской аглоруды (25/50/25) и смеси аглоруд в равных долях (33/33/33) демонстрировали промежуточные значения средней эквивалентной по поверхности крупности, равные соответственно 3,56 мм и 3,53 мм.

Для двойных смесей аглоруд улучшение условий окомкования, отмечаемое по росту средней эквивалентной по поверхности крупности сырой окомкованной шихты, приводило к последовательному росту основных показателей спекания и качества агломерата. Так, в двойных смесях, содержащих Стойленскую и Михайловскую аглоруды, увеличение доли Стойленской аглоруды с 25% до 75% приводило к повышению основных показателей спекания и качества агломерата:

- вертикальной скорости спекания – с 22,6 мм/мин до 22,8 мм/мин;
- выхода годного агломерата по классу +5 мм – с 85,0% до 86,1%;
- удельной производительности лабораторной аглоустановки по годному агломерату класса +5 мм – с 1,459 т/(м²·ч) до 1,490 т/(м²·ч);
- сопротивления годного агломерата удару по содержанию класса +5 мм после испытания по ГОСТ 15137-77 с 76,5% до 79,4%.

Истирание годного агломерата по содержанию класса 0-0,5 мм после испытания по ГОСТ 15137-77 при этом снизилось с 2,9% до 2,4%.

В двойных смесях из Стойленской и Богословской аглоруд, а также Богословской и Михайловской аглоруд обозначенная выше тенденция изменения

показателей спекания и качества агломерата в зависимости от состава точно повторяется. Поэтому лучшие показатели среди двойных смесей были получены для шихты на основе смеси агломерационных руд Стойленской и Богословской, взятых в соотношении 75/25.

Применение этой смеси аглоруд позволило обеспечить следующие показатели агломерации и качества спека:

- выход годного агломерата - 86,4% (на 0,5% (отн.) выше базового значения);
- удельную производительность лабораторной агломерационной установки по годному агломерату – 1,502 т/(м²·ч) (на 5,8% выше базового значения);
- сопротивление годного агломерата удару – 80,0% (на 6,5% (отн.) выше базового значения);
- истирание годного агломерата – 2,3% (на 14,8% (отн.), по сравнению с базовым значением);
- содержание железа в агломерате – 62,87% (на 1,48% (абс.) по сравнению с базовым значением).

Составление тройных смесей аглоруд позволило дополнительно повысить показатели спекания и качества агломерата, по сравнению с двойными смесями, и добиться лучших в экспериментальной серии результатов. Так, при использовании шихты со смесью аглоруд Стойленской, Богословской и Михайловской, взятых в соотношении 50/25/25, было достигнуто следующее изменение показателей по отношению к базовым значениям:

- средняя эквивалентная по поверхности крупность сырой окомкованной шихты возросла с 3,30 мм до 3,61 мм (на 9,4%);
- вертикальная скорость спекания возросла с 22,1 мм/мин до 23,5 мм/мин (на 6,3%);
- выход годного агломерата упал с 86,0% до 85,6% (на 0,5% (отн.));
- удельная производительность лабораторной агломерационной установке по годному агломерату увеличилась с 1,419 т/(м²·ч) до 1,550 т/(м²·ч) (на 9,2 %);
- сопротивление годного агломерата удару повысилось с 75,1% до 80,9% (на 7,7% (отн.));
- истирание годного агломерата упало с 2,7% до 2,3% (на 14,8% (отн));
- железо в агломерате возросло с 61,39% до 62,38% (на 0,99% (абс.)).

Таким образом, было получено рациональное соотношение между агломерационными рудами в смеси из Стойленской, Богословской и Михайловской аглоруд. Для получения лучших в серии показателей спекания и качества агломерата брали смесь аглоруд, содержащую 50% Стойленской аглоруды, по 25% Богословской и Михайловской аглоруд. Выявленный в данной серии опытов состав рациональной смеси соответствует рациональному составу смеси, установленному по результатам спекания шихт с двойными и тройными смесями агломерационных руд на основе Михайловского стандартного концентрата.

3.2.3 Вовлечение в состав аглошихты Туканской руды

Туканскую руду вводили в состав агломерационной шихты на основе концентрата ССГПО и Михайловского ГОКов взамен части базовой смеси аглоруд. За базовую принимали смесь агломерационных руд, содержащую 73% Михайловской аглоруды и 27% Богословской аглоруды. Сначала разновидности Туканской руды вводили в количестве 10% от общей массы смеси аглоруд, затем для наиболее перспективной разновидности увеличивали ее содержание в смеси до 50% и далее до 100%. Для разновидности руды из шламонакопителя был проведен отдельный комплекс исследований.

Результаты экспериментальных спеканий агломерационных шихт с различными разновидностями Туканской руды приведены в табл. 3.12.

Как видно из табл. 3.12, введение Туканской руды приводило к повышению средней эквивалентной по поверхности крупности сырой окомкованной шихты с 3,28 мм (базовый опыт) до 3,31-3,99 мм, в зависимости от используемой разновидности. Наибольший рост достигался при использовании II фабрики (фракция 40-100 мм), которая наиболее богатая по железу (50,6%). Ее вводили в шихту в количестве 10%, 50% и 100% от массы смеси аглоруд. Средняя эквивалентная по поверхности крупность сырой окомкованной шихты составила соответственно 3,62 мм, 3,80 мм и 3,99 мм.

Таблица 3.12

Параметры окомкования, показатели агломерационного процесса и качества агломерата для шихт на основе различных разновидностей Туканской руды и концентрата ССГПО

№ п/п	Показатели	База	I фабрика	II фабрика по фракциям исходной руды			Ж/д станция по фракциям исходной руды		Западная Майгашля	
				20-40	40-100		0-5	40-100		0-5
1	Содержание Туканской аглоруды, % от массы смеси аглоруд	-	10	10	10	50	100	10	10	10
2	Средневзвешенная крупность сырой окомкованной шихты, мм	4,36	4,58	4,61	4,70	4,73	4,81	4,46	4,43	4,36
3	Средняя эквивалентная по поверхности крупность сырой окомкованной шихты, мм	3,28	3,40	3,62	3,63	3,80	3,99	3,37	3,35	3,31
4	Оптимальная влажность шихты, %	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
5	Выход годного (по классу +5мм), %	87,5	84,5	81,2	85,4	83,2	82,5	84,8	81,7	85,3
6	Удельная производительность (по классу + 5 мм), т/(м ² ·ч)	1,366	1,302	1,328	1,467	1,469	1,345	1,363	1,324	1,266
7	Вертикальная скорость спекания, мм/мин	20,6	20,3	21,6	22,7	23,3	21,5	21,2	21,4	19,6
8	Барабанная проба, %:									
	- сопротивление годного агломерата удару (+5 мм)	75,3	72,9	72,4	74,2	74,4	74,3	70,0	71,8	74,5
	- разрушение годного агломерата (0,5-5 мм)	22,1	24,2	24,6	23,1	22,4	22,4	26,6	25,0	22,7
	- истирание годного агломерата (0-0,5 мм)	2,6	2,9	3,0	2,7	3,2	3,3	3,4	3,2	2,8
9	Расход известняка, кг/т	55,02	61,41	54,37	53,81	50,06	44,92	60,12	54,98	57,61
10	Химический состав агломерата, %:									
	Fe	60,99	60,54	60,91	61,11	61,47	61,96	60,45	60,82	60,60
	CaO	9,92	10,12	9,81	9,77	9,26	8,60	10,05	9,84	10,02
	SiO ₂	6,20	6,32	6,13	6,11	5,79	5,38	6,30	6,14	6,26
	MgO	1,75	1,77	1,73	1,72	1,65	1,55	1,78	1,73	1,75
	Al ₂ O ₃	1,47	1,56	1,54	1,49	1,54	1,62	1,56	1,51	1,55
	S	0,032	0,030	0,031	0,031	0,029	0,026	0,030	0,031	0,031
	P	0,017	0,019	0,018	0,020	0,029	0,040	0,017	0,018	0,018
	MnO	0,17	0,19	0,19	0,18	0,23	0,28	0,19	0,19	0,20

Использование разностей с большой долей мелкой фракции 0-3 мм давало сырую окомкованную шихту с крупностью, близкой к базовой. Так, введение руды с места отбора Западная Майгашля в количестве 10% позволило повысить среднюю эквивалентную по поверхности крупность сырой окомкованной шихты лишь до 3,31 мм (на 0,9%, по сравнению с базой).

Введение любой разновидности Туканской руды, представляющей собой бурый железняк, взамен части смеси из магнетитовой руды Богословского рудоуправления и гематитовой руды Михайловского ГОК приводило к ухудшению тепловых условий процесса спекания. В результате менее полного пропекания гранул агломерата наблюдалось систематическое снижение выхода годного с 87,5% (база) до 82,9-85,4%, и сопротивления годного агломерата удару с 75,3% до 70,0-74,4% в зависимости от используемой разновидности, при увеличении показателя истираемости годного агломерата с 2,6% (база) до 2,7-3,4% (опытные спекания). Встречное действие производило улучшение условий окомкования (табл. 3.12), повышающее вертикальную скорость спекания и, как следствие, тепловой уровень процесса. Введение в состав шихты наиболее богатой по железу ($Fe_{\text{общ}} = 50,6\%$) разновидности Туканской аглоруды (II фабрика, исходная фракция до дробления 40-100 мм) обеспечивало повышение содержания железа в агломерате с 60,99% (база) до 61,11-61,96%, в зависимости от содержания Туканской руды в смеси аглоруд. При использовании в составе шихты оставшихся разновидностей аглоруд Туканского месторождения наблюдали снижение содержания железа в агломерате по отношению к базовому уровню от 60,99 до 60,45-60,91% в зависимости от вида руды.

Наибольший выход годного агломерата, составивший 85,4%, был достигнут при введении в состав шихты Туканской руды II фабрики (исходная фракция до дробления 40-100 мм) в количестве 10% от массы смеси аглоруд. При увеличении ее содержания в агломерационной шихте от 10 до 50% и 100% выход годного агломерата снижался от 85,4 до 83,2% и 82,5% соответственно из-за ухудшения тепловых условий, которое могло быть обусловлено увеличением в шихте доли разлагающегося эндотермически гидрогетита, присутствующего в Туканской руде.

Использование в составе шихты Туканской руды II фабрики (исходная фракция до дробления 40-100 мм) в количестве 10% и 50% от массы смеси аглоруд соответственно обеспечивала наибольшие значения вертикальной скорости спекания в серии, равные 22,7 мм/мин и 23,3 мм/мин. В результате были получены максимальные в серии значения удельной производительности агломашины по годному агломерату фракции +5 мм, составившие 1,467 и 1,469 т/(м²·ч) соответственно. При дальнейшем увеличении количества вводимой Туканской руды II фабрики (исходная фракция до дробления 40-100 мм) до 100% наблюдалось снижение производительности агломерационной установки до отметки в 1,345 т/(м²·ч), что ниже базового уровня. По-видимому, дальнейшее укрупнение гранул сырой окомкованной шихты (табл. 3.12) при полной замене базовой смеси аглоруд на Туканскую руды II фабрики (исходная фракция до дробления 40-100 мм) при снижении теплового уровня процесса за счет эндотермических реакций разложений гидрогетита обуславливало недостаточное проплавление материала и формирование агломерата со сниженным выходом годного (82,5%) и повышенной истираемостью (3,3%), в сравнении с опытами по частичной замене. Таким образом, содержание Туканской руды II фабрики (исходная фракция до дробления 40-100 мм) не должно превышать 50% от общей массы смеси аглоруд.

Использование в составе шихты Туканской руды привезенной с ж/д станции позволило получить относительно высокий для серии выход годного агломерата (84,8%) при удельной производительности агломашины на уровне 1,363 т/(м²·ч), что близко к базовому значению в 1,366 т/(м²·ч), однако холодная прочность агломерата существенно снизилась - сопротивление годного агломерата удару по содержанию фр. +5 мм после испытания по ГОСТ 15137-77 упало с 75,3% (база) до 70,0% (опыт).

Процесс агломерации с применением в составе шихты оставшихся аглоруд протекал хуже по сравнению с агломерацией базовой смеси аглоруд (табл. 3.12). По-видимому, это связано со снижением теплового уровня процесса при недостаточной компенсации за счет улучшения окомкования, в результате чего

снизилась полнота проплавления гранул, и вследствие этого упал выход годного агломерата.

Исследовали агломерационный процесс с Туканской рудой из шламонакопителя (фр. 0-8 мм). Результаты приведены в табл. 3.13. Ее вводили в состав шихты на основе концентратов ССГПО и Михайловского ГОКов(стандартный и флотационный). Расход Туканской руды из шламохранилища составлял от 10 до 100% от общей массы смеси аглоруд для условий использования концентрата ССГПО и от 30 до 50% от общей массы смеси аглоруд для условий использования концентратов Михайловского ГОК.

По соображениям, приведенным выше для объяснения динамики изменения показателей спекания и качества агломерата при изменении доли Туканской аглоруды из шламохранилища в составе смеси аглоруд (встречное действие факторов повышения крупности сырой окомкованной шихты и снижения теплового уровня за счет увеличения доли разлагающегося эндотермически гидрогетита), в шихтах на основе концентрата ССГПО вовлечение и последующее повышение доли Туканской руды из шламонакопителя приводило к снижению выхода годного агломерата с 87,5% (база) до 84,8; 84,4; 85,0%, 83,6% соответственно для содержания в шихте Туканской руды из шламонакопителя на уровне 10; 30; 50 и 70% от общей массы руды и далее до 81,9% при полной замене. Удельная производительность аглоустановки сначала возрастала при последовательном увеличении доли Туканской руды с 1,267 т/(м²·ч) до 1,293 т/(м²·ч) и далее до 1,347 т/(м²·ч) для 10%, 30% и 50% руды в смеси соответственно, что являлось результатом увеличения крупности сырой окомкованной шихты. В точке, соответствующей содержанию руды в смеси 50%, отмечался максимум удельной производительности агломашин, после чего при увеличении доли Туканской руды до 70% и далее до полной замены наблюдалось снижение удельной производительности установки от 1,347 соответственно до 1,271 т/(м²·ч) и 1,255 т/(м²·ч) соответственно вследствие преобладания фактора снижения теплового уровня процесса.

Таблица 3.13

Параметры окомкования, показатели агломерационного процесса и качества агломерата для шихт на основе Туканской руды из шламонакопителя и различных концентратов

№ п/п	Показатели	На основе концентрата ССГПО					На основе Михайловского концентрата		На основе Михайловского флотоконцентрата	
		10	30	50	70	100	30	50	30	50
1	Содержание Туканской руды, % от массы смеси аглоруд									
2	Оптимальная влажность шихты, %	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
3	Средневзвешенная крупность сырой окомкованной шихты, мм	4,42	4,38	4,50	4,65	4,80	4,51	4,75	4,34	4,65
4	Средняя эквивалентная по поверхности крупность сырой окомкованной шихты, мм	3,41	3,45	3,62	3,78	3,84	3,55	3,90	3,38	3,75
5	Выход годного (по классу +5 мм), %	84,8	84,4	85,0	83,6	81,9	83,9	84,9	84,4	85,5
6	Удельная производительность (по классу + 5 мм), т/(м ² ·ч)	1,267	1,293	1,347	1,271	1,255	1,261	1,294	1,409	1,414
7	Вертикальная скорость спекания, мм/мин	19,2	19,7	20,3	19,5	19,7	19,3	19,6	22,5	21,2
8	Барабанная проба, %:									
	- сопротивление годного агломерата удару (+5 мм)	75,3	73,3	72,0	71,3	73,5	77,3	76,4	75,8	74,3
	- разрушение годного агломерата (0,5-5 мм)	22,4	24,3	25,3	26,1	24,5	20,3	21,2	21,6	23,2
	- истирание годного агломерата (0-0,5 мм)	2,3	2,5	2,8	2,6	2,0	2,4	2,4	2,7	2,5
9	Расход известняка, кг/т	57,64	62,78	67,91	72,92	81,10	128,91	133,93	80,03	85,04
10	Химический состав агломерата, %:									
	Fe	60,70	60,13	59,54	58,99	58,12	56,03	55,47	60,56	60,00
	CaO	10,04	10,27	10,52	10,73	11,13	14,38	14,62	10,97	11,19
	SiO ₂	6,27	6,42	6,58	6,72	6,95	8,98	9,13	6,85	6,99
	MgO	1,76	1,78	1,80	1,81	1,85	1,63	1,65	1,16	1,18
	Al ₂ O ₃	1,59	1,82	2,06	2,30	2,67	0,75	0,98	0,83	1,07
	S	0,031	0,030	0,028	0,026	0,025	0,013	0,012	0,013	0,012
	P	0,019	0,022	0,025	0,026	0,031	0,015	0,018	0,014	0,017
	MnO	0,19	0,23	0,27	0,30	0,36	0,09	0,13	0,10	0,13

Сопротивление годного агломерата удару изменялось при изменении доли Туканской руды из шламонакопителя по кривой с минимумом, равным 71,3% и соответствующим содержанию руды 70%, а истирание годного агломерата – по кривой с максимумом, равным 2,8% и соответствующим 50% содержания руды. Агломерат, полученный из шихты, включающей Туканскую руду из шламонакопителя в количестве от 50% до 70%, имел минимальную в серии «холодную прочность».

Значительное увеличение показателей «холодной прочности» агломерата было отмечено при замене концентрата ССГПО на Михайловский стандартный концентрат. Так, при содержании руды 30 и 50% сопротивление годного агломерата удару росло с 72,0-73,3% до 76,4-77,3% при снижении показателя истираемости с 2,5-2,8% до 2,4%. Выход годного агломерата при этом несколько снизился, с 84,4-85,0% до 83,9-84,9%. Удельная производительность уменьшилась с 1,293 до 1,261 т/(м²·ч) для содержания Туканской руды из шламонакопителя, равной 30% и с 1,347 до 1,294 т/(м²·ч) для ее содержания 50%.

При замене концентрата Михайловского стандартного на Михайловский флотационный в условиях содержания Туканской рудой из шламонакопителя в количестве 30 и 50% повышалось общее железо в агломерате с 55,47-56,03% до уровня 60,00-60,56%. Из-за улучшения условий окомкования, обеспечиваемых Туканской рудой из шламонакопителя, возрос выход годного агломерата с 83,9-84,9% до 84,4-85,5% и вертикальная скорость спекания с 19,3-19,6 мм/мин до 21,2-22,5 мм/мин, что привело к росту удельной производительности агломашины по годному агломерату с 1,261-1,294 т/(м²·ч) до 1,409-1,414 т/(м²·ч). Однако при этом несколько снизился показатель сопротивления годного агломерата удару, с 76,4-77,3% до 74,3-75,8%, при росте истираемости с 2,4% до 2,5-2,7% (табл. 3.13).

Таким образом, при введении в состав агломерационной шихты аглофабрики №5 ПАО «ММК» различных разновидностей Туканской руды была выявлена ее разновидность, обеспечивающая наиболее высокие возможные технико-экономические показатели агломерационного процесса. Так, шихта, включающая от 10% до 50% Туканской руды II фабрики (исходная фракция до дробления – 40-

100 мм) на основе концентрата ССГПО обеспечивала, по сравнению с шихтой на основе базовой смеси аглоруд следующие изменения показателей:

- рост удельной производительности лабораторной агломерационной установки с 1,366 т/(м²·ч) до 1,467-1,469 т/(м²·ч) (в среднем на 7,5%);
- снижение показателя сопротивления годного агломерата удару с 75,3% до 74,2-74,4% (в среднем на 1,0% (абс.));
- снижение выхода годного агломерата с 87,5% до 83,2-85,4% (в среднем на 3,2% (абс.)).

3.3. Производство агломерата на основе рациональных смесей концентратов и аглоруд

На основе разработанной рациональной смеси железорудных концентратов и агломерационных руд оценили технологические показатели агломерационного процесса и качество полученного агломерата. Шихта включала концентраты Михайловского и Лебединского ГОКов в соотношении 70/30 при общей доле смеси концентратов 72,2% от рудной части шихты и агломерационные руды – Михайловская, Богословская и Стойленская в соотношении соответственно 25; 25 и 50%.

Дополнительно исследовали влияние перспективной руды Бапы на основные показатели агломерации и качество получаемого агломерата. Для составления шихт использовали концентраты Михайловского и Лебединского ГОКов в соотношении 70/30 при общей доле смеси концентратов 72,2% от рудной части шихты и смеси агломерационных руд при общей их 19,0% от рудной части с различным содержанием руды Бапы:

- 0% Бапы / 100% Михайловская;
- 25% Бапы / 75% Михайловская;
- 50% Бапы / 50% Михайловская.

Результаты спеканий шихт на основе разработанной рациональной смеси концентратов и различных смесей агломерационных руд представлены в табл. 3.14.

Параметры окомкования, показатели агломерационного процесса и качества агломерата для шихт на основе рациональной смеси концентратов и различных смесей аглоруд

№ п/п	Показатели	Агломерационная руда / смесь руд			
		Михайловская моно	Михайловская / Богословская / Стойленская (25/25/50)	Бабы / Михайловская	
				25 / 75	50 / 50
1	Оптимальная влажность шихты, %	8,0	8,0	8,0	8,0
2	Средневзвешенная крупность сырой окомкованной шихты, мм	3,98	4,44	3,90	3,56
3	Средняя эквивалентная по поверхности крупность сырой окомкованной шихты, мм	2,83	3,19	2,75	2,51
4	Выход годного (по классу +5мм), %	82,4	84,6	82,7	83,6
5	Удельная производительность (по классу + 5 мм), т/(м ² ·ч)	1,366	1,438	1,471	1,526
6	Вертикальная скорость спекания, мм/мин	21,9	22,3	23,5	24,1
7	Барабанная проба, %: - сопротивление годного агломерата удару (+5 мм) - разрушение годного агломерата (0,5-5 мм) - истирание годного агломерата (0-0,5 мм)	78,6 18,9 2,5	80,2 17,3 2,5	82,5 15,1 2,5	81,3 16,3 2,5
8	Расход известняка, кг/т	111,59	90,83	109,18	107,16
9	Химический состав агломерата, %:				
	Fe	58,31	59,69	58,34	58,31
	CaO	12,96	11,80	12,70	12,52
	SiO ₂	8,11	7,36	7,96	7,81
	MgO	1,49	1,40	2,64	3,81
	Al ₂ O ₃	0,36	0,55	0,31	0,26
	S	0,009	0,017	0,009	0,008
	P	0,012	0,015	0,013	0,015
	MnO	0,04	0,04	0,05	0,06

Как видно из табл. 3.14, использование смеси агломерационных руд Михайловская, Богословская и Стойленская в соотношении соответственно 25; 25 и 50%, по сравнению с моноаглорудой Михайловского ГОК, обеспечивало повышение эквивалентной по поверхности крупности сырой окомкованной шихты от 2,83 до 3,19 мм. При замене части Михайловской аглоруды на руду Бапы в составе двойных смесей средняя эквивалентная по поверхности крупность сырой окомкованной шихты последовательно снижалась с 2,83 мм до 2,75 мм и 2,51 мм в направлении от чистой Михайловской аглоруды к двойным смесям, содержащим 25% и 50% аглоруды Бапы соответственно.

Анализ химического состава железорудных материалов показывает, что рациональная смесь агломерационных руд Михайловская/Богословская/Стойленская, взятых в соотношении 25/25/50, отличается повышенным содержанием оксида алюминия, поэтому при спекании ее в смеси с рациональными смесями концентратов, практически не содержащими данный оксид, такими как двойные смеси Лебединский-Михайловский и Лебединский-Михайловский флотационный, происходит рационализация по количеству данного оксида и формируется значительное количество связки на основе SFCA-фазы, являющейся основным носителем прочности офлюсованного агломерата. В то же время концентрат ССГПО обладает достаточно высоким собственным содержанием оксида алюминия (содержание Al_2O_3 составляет 1,44%, табл. 2.4), поэтому в случае смесей с участием данного концентрата рационализация смеси аглоруд не оказывает настолько явного влияния на прочность агломерата.

Развитие процессов образования жидкой фазы и её затвердевания ведёт к формированию блочной макроструктуры агломерата. В произведённом спёке агломерата разрушение крупных блоков, имеющих пониженную прочность связей, дроблением, выделение горячего и холодного возврата и постели, после этого, ведут к формированию гранулометрического состава и прочностных свойств товарного агломерата. Рациональная крупность блоков соответствует оптимальному размеру агломерата для доменной плавки и равна 20 – 25 мм.

Разделение блоков при дроблении происходит по перегородкам между крупными порами с минимальной толщиной. Поэтому гранулометрический состав агломерата служит характеристикой ранее сформировавшихся блоков. Пористость и параметры пор (объём, поверхность, линейные размеры пор и перегородок) отдельных фракций характеризуют внутреннее строение блоков.

По макроструктуре формируются 3 группы товарного агломерата:

- мелкопористая;
- крупнопористая;
- монолитная.

Агломерат с мелкопористой структурой характеризуется распространённостью пор размером не более 4 мм, равномерно распределённых в массе куска. Крупнопористой структуре соответствуют размеры пор 10 – 15 мм. Монолитной является камневидная плотная структура.

При производстве агломерата возникают термические, межфазовые и фазовые напряжения, действующие в различной степени на прочность. Термические напряжения возникают в результате разницы температур между периферией куска и его центром. Межфазовые напряжения являются результатом различия коэффициентов термического расширения отдельных фаз. Внутрифазовые напряжения возникают вследствие аллотропных превращений.

Выявленный рациональный состав агломерационной шихты уменьшил действие напряжений за счет замены стекловидной фазы на кристаллическую ферритную связку на основе силикоферритов кальция-алюминия и действовал таким путём на повышение прочности агломерата и производительности агломерационной машины.

Спекание разработанной рациональной смеси аглоруд Михайловская/Богословская/Стойленская в соотношении 25/25/50 в составе шихты на основе рациональной смеси концентратов позволило зарегистрировать

следующие изменения показателей агломерационного процесса и качества агломерата, по сравнению с различными вариантами шихты:

1. Шихтой на основе рациональной смеси концентратов и 100% Михайловской агломерационной руды:

- удельная производительность лабораторной агломерационной установки по годному агломерату увеличилась с 1,366 до 1,438 т/(м²·ч) (на 5,3%);

- выход годного агломерата по классу +5 мм вырос с 82,4% до 84,6% (на 2,7% (отн.));

- сопротивление годного агломерата удару по содержанию фракции +5 мм после испытания по ГОСТ 15137-77 увеличилось с 78,6% до 80,2% (на 2,0% (отн.)).

2. Шихтой на основе моноконцентрата Михайловского ГОК и рациональной смеси агломерационных руд – Михайловская, Богословская и Стойленская в соотношении соответственно 25; 25 и 50:

- удельная производительность лабораторной аглоустановки по годному агломерату увеличилась с 1,406 до 1,438 т/(м²·ч) (на 2,3%);

- выход годного агломерата по классу +5 мм снизился с 86,4% до 84,6% (на 1,9% (отн.));

- сопротивление годного агломерата удару по содержанию фракции +5 мм после испытания по ГОСТ 15137-77 увеличилось с 78,4% до 80,2% (на 2,3% (отн.)).

3. Шихтой на основе смеси стандартного Михайловского концентрата и моноруды Михайловского или Богословского или Стойленского ГОКов:

- удельная производительность лабораторной аглоустановки по годному агломерату увеличилась с 1,369 до 1,438 т/(м²·ч) (на 5,0%);

- выход годного агломерата по классу +5 мм вырос с 84,3% до 84,6% (на 0,4% (отн.));

- сопротивление годного агломерата удару по содержанию фракции +5 мм после испытания по ГОСТ 15137-77 увеличилось с 75,5% до 80,2% (на 6,2% (отн.)).

Введение в состав шихты руды Бапы с долей 25 и 50% от массы смеси руд взамен Михайловской аглоруды обеспечивало положительное влияние на показатели агломерационного процесса. Выход годного агломерата по классу +5

мм (табл. 3.14) вырос с 82,4% для шихты на основе 100 % Михайловской аглоруды до 82,7% для двойной смеси аглоруд, содержащей 75% Михайловской аглоруды и 25% руды месторождения Бапы, и далее до 83,6% для шихты на основе смеси аглоруд, содержащей руды месторождений Михайловское и Бапы в равных количествах. Удельная производительность лабораторной агломерационной установки по годному агломерату последовательно возрастала с 1,366 т/(м²·ч) для шихты на основе 100% Михайловской аглоруды до 1,471 т/(м²·ч) и далее до 1,526 т/(м²·ч) для шихт с содержанием аглоруды месторождения Бапы 25% и 50% соответственно от общей массы смеси аглоруд. Такой резкий рост производительности агломерационной установки с увеличением содержания магнезиальной руды Бапы демонстрировал тесную связь с содержанием оксида магния в агломерате (табл. 3.14), которое последовательно возрастало с 1,49% для агломерата из шихты на основе 100% Михайловской аглоруды до 2,64% для агломерата из шихты на основе 75% Михайловской аглоруды и 25% руды месторождения Бапы и далее до 3,81% для агломерата из шихты, содержащей руды месторождений Михайловское и Бапы в равных пропорциях.

Характеристики «холодной прочности» агломерата улучшались по кривой с максимумом при введении и увеличении количества аглоруды Бапы. При переходе от шихты на основе 100% Михайловской аглоруды к шихте, содержащей 25% руды Бапы, и далее к шихте, содержащей Михайловскую руду и руду месторождения Бапы в равных долях, сопротивление годного агломерату удару по ГОСТ 15137-77 возрастало с 78,6% до 82,5% и 81,3% соответственно при одинаковом показателе истирания агломерата, составляющем 2,5% для всех трех шихт. Руда Бапы содержит оксид магния в легкоусвояемой минеральной форме, поэтому ее использование облегчает формирование расплава и повышает его жидкоподвижность при агломерации, в результате чего формируется более прочный, магнезиальный агломерат.

3.4 Пути повышения качества агломерата вводом в состав шихты различных связующих материалов

Базовую шихту спекали без использования новых добавочных материалов для следующих условий:

- распределение расхода воды между барабаном-смесителем и барабаном-окомкователем составляло в соотношении 80:20;
- основность агломерата 1,6;
- содержание извести 3,5%;
- варианты использования шихты: летний и зимний (см. п. 2.1.5).

Экспериментальным путем подобрали рациональную влажность шихты, которая составила 9,5%. При спекании летней шихты, окомкованной с данным уровнем влажности, удельная производительность (по классу + 5 мм) составила 1,373 т/(м²·час), при выходе годного 87,6%. В условиях спекания зимней шихты показатели были ниже и составляли соответственно 1,238 т/(м²·час) и 87,2%.

При введении окомковывающих добавок для лучшего распределения их в шихте добавки предварительно перемешивали с известью до однородности.

Результаты исследований новых добавочных материалов (интерполимерное связующее, отходы сероулавливающей установки в исходном состоянии и прокаленные при температуре 160 и 600 °С, бентонит), вводимых в шихту взамен части извести, приведены в табл. 3.20-3.27, в сравнении с результатами спеканий базовой шихты. В табл. 3.28 и 3.29 представлены результаты исследований физико-химических свойств опытных агломератов, в сравнении с базовым агломератом, не содержащим опытных добавок.

3.4.1 Интерполимерное связующее

Интерполимерное связующее вводили в состав шихты взамен части извести по вариантам:

- в летний штабель;
- в зимний штабель;
- в барабан – смеситель.

Для условий летней шихты ИПС вводили в штабель взамен извести с долей в интервале 0,2 – 0,8%. Полученные результаты представлены в табл. 3.20 и 3.21. Ввод добавки в штабель в небольших количествах – 0,2% незначительно улучшал процесс окомкования по сравнению с базовым периодом (см. табл. 3.20), что сопровождалось увеличением удельной производительности агломерационной установки в условиях сохранения выхода годного согласно табл. 3.21.

Сопротивление годного агломерата удару (+5 мм) увеличилось от 75,5 до 76,1%. Дальнейшее повышение расхода добавки до 0,4-0,5% обеспечивало улучшение процесса окомкования, что повышало прочностные характеристики образовавшихся гранул.

При доле ИПС в шихте 0,5% по сравнению с базовым периодом сопротивление сырых гранул сжатию в среднем увеличилось на 36%, выход фракции +5 мм после 10 сбрасываний гранул крупностью 5-12 мм с высоты 300 мм увеличился на 16%. Удельная производительность (по классу + 5 мм) увеличилась с 1,373 до 1,414 т/(м²·час) в условиях незначительного повышения выхода годного от 87,6 до 87,7%. Введение ИПС в таком количестве в условиях сохранения основности сопровождалась снижением содержания железа от 57,1 до 56,6% (табл. 3.21).

Дальнейшее увеличение ИПС от 0,5 до 0,8% сопровождалось снижением прочностных свойств сырых гранул и снижением технико-экономических показателей процесса агломерации, согласно полученным данным.

Ввиду того, что наиболее высокие прочностные показатели и увеличенную удельную производительность при вводе связующей добавки наблюдали для условий содержания ее в рудной части шихты 0,5%, дальнейшие исследования проводили для двух расходов связующего компонента: 0,2% (рекомендация производителя) и 0,5%.

Результаты окомкования агломерационной шихты при замене в летнем штабеле части извести на интерполимерное связующее в условиях рациональной влажности шихты – 9,5%

№ п/п	Наименование показателей	Содержание ИПС в шихте, %					
		0	0,2	0,4	0,5	0,6	0,8
1	Содержание извести, %	3,5	3,3	3,1	3,0	2,9	2,7
2	Сопротивление сырых гранул сжатию, (гс/ гранула) по фракциям: 5-12 мм 3-5 мм	1,70	1,47	1,75	1,72	1,13	-
		1,21	1,58	2,04	1,50	1,10	1,10
3	Выход фракции +5 мм после 5 / 10 сбрасываний гранул крупностью 5-12 мм с высоты 300 мм	60/40	60/40	60/40	60/50	60/40	-/-
4	Выход фракции +3 мм после 5 / 10 сбрасываний гранул крупность 3-5 мм с высоты 300 мм	66/48	70/50	80/50	80/50	60/40	50/40
5	Содержание (%) по классам крупности окомкованной шихты, мм:						
	+8	2,96	1,93	1,22	0,61	1,01	0,31
	5-8	23,96	18,98	15,07	6,51	14,81	14,81
	3-5	44,54	46,81	30,96	43,18	40,16	36,95
	2-3	20,94	24,16	32,59	34,01	29,82	31,14
6	Крупность окомкованной шихты, мм: эквивалентная по поверхности средневзвешенная	8,09	8,12	20,16	15,69	14,20	16,81
		3,17	3,07	2,31	2,43	2,59	2,49
		4,24	3,98	3,36	3,22	3,56	3,42

Результаты спеканий аглошихт при замене в летнем штабеле части извести на интерполимерное связующее в условиях рациональной влажности шихты – 9,5%

№ п/п	Наименование показателей	Содержание ИПС в шихте, %					
		0	0,2	0,4	0,5	0,6	0,8
1	Содержание извести, %	3,5	3,3	3,1	3,0	2,9	2,7
2	Выход годного (по классу +5мм), %	87,6	87,6	87,7	87,7	85,4	84,5
3	Удельная производительность (по классу + 5 мм), т/(м ² ·час)	1,373	1,380	1,393	1,414	1,354	1,333
4	Показатели прочности агломерата, %:						
	- сопротивление годного агломерата удару (+5мм)	75,5	76,1	77,7	76,0	74,5	73,3
	- разрушение годного агломерата (0,5-5мм)	21,7	21,1	19,6	21,5	22,4	24,3
	- истирание годного агломерата (0-0,5мм)	2,9	2,8	2,7	2,5	3,1	2,5
5	Скорость спекания, мм/мин	19,7	19,63	20,0	20,8	20,0	20,0
6	Коэффициент сопротивления сырой шихты	0,57	0,58	0,68	0,59	0,65	0,69
7	Коэффициент сопротивления шихты в момент зажигания	1,27	1,34	1,31	1,50	1,46	1,59
8	То же, в момент окончания спекания	0,85	0,82	0,85	0,77	0,79	0,77
9	То же, в момент окончания опыта	0,35	0,34	0,35	0,32	0,32	0,32
10	Максимальная температура в вакуум-камере, °С	643	675	700	660	590	655
11	Химический состав агломерата, %:						
	Fe	57,1	56,9	56,7	56,6	56,4	56,2
	CaO	12,52	12,59	12,67	12,70	12,74	12,82
	SiO ₂	7,82	7,87	7,92	7,94	7,96	8,01
	MgO	2,02	1,99	2,01	2,08	2,11	2,27
	TiO ₂	0,19	0,19	0,19	0,18	0,20	0,18
	Al ₂ O ₃	1,25	1,29	1,30	1,33	1,37	1,36
	MnO	0,15	0,19	0,18	0,22	0,21	0,24
	Zn	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
	Cr	0,018	0,018	0,018	0,020	0,019	0,021
	S	0,050	0,049	0,048	0,047	0,047	0,046

Для зимнего варианта шихты ИПС вводили в штабель. Для летнего варианта шихты ИПС дополнительно вводили в барабан – смеситель. По обоим вариантам ввод ИПС с содержанием 0,5% от массы рудной части шихты имел положительное влияние на показатели прочности сырых гранул, удельную производительность при некотором уменьшении выхода годного агломерата. Результаты этих экспериментов представлены в табл. 3.22 и 3.23.

При сравнении результатов агломерации с применением шихты, заложенной для условий «зимнего» и летнего периодов следует вывод, что в «сухом» штабеле известь и ИПС в меньшей степени связывают компоненты шихты, что приводит к ухудшению процессов ее окомкования. Показатели окомкования, агломерации и прочности готового агломерата для условий базовых вариантов шихты с использованием 3,5% извести для зимнего периода по сравнению с летним уменьшились:

- Сопротивление сырых гранул сжатию на 23,5% отн.;
- Выход фракции +5 мм после 5 сбрасываний гранул крупностью 5-12 мм с высоты 300 мм на 10,7%;
- Удельная производительность агломерационной установки на 9,8% отн.;
- Сопротивление годного агломерата удару (+5мм) на 1,69%.

Введение ИПС в количестве 0,5% в состав «зимнего» штабеля взамен извести уменьшал содержание железа на 0,5% абс.

Показатели окомкования улучшились (табл. 3.22):

- повысилось на 11,3% отн. сопротивление сырых гранул фракции 3-12 мм сжатию;
- увеличился на 13,8% отн. выход фракции +5 мм после 10 сбрасываний гранул крупностью 3-12 мм с высоты 300 мм;
- уменьшилась эквивалентная по поверхности крупность на 15,8% отн.

Показатели агломерации и прочностные свойства готового агломерата увеличились следующим образом (табл. 3.23):

- удельная производительность агломерационной установки на 4,0% отн.;
- сопротивление годного агломерата удару (+5мм) на 1,2% отн.
-

Таблица 3.22

Результаты окомкования агломерационной шихты при замене части извести на интерполимерное связующее в условиях рациональной влажности шихты – 9,5%

№ п/п	Наименование показателей	Содержание ИПС в шихте			
		0	0,5	0,2	0,5
1	Содержание извести, %	3,5	3,0	3,3	3,0
2	Вариант штабеля	зимний		летний	
3	Место ввода ИПС	штабель		барабан - смеситель	
4	Сопротивление сырых гранул сжатию, (гс/ гранула) по фракциям: 5-12 мм 3-5 мм	1,6	1,65	1,57	1,80
		1,19	1,42	1,64	1,90
5	Выход фракции +5 мм после 5 / 10 сбрасываний гранул крупностью 5-12 мм с высоты 300 мм	53/40	50/50	75/35	70/50
6	Выход фракции +3 мм после 5 / 10 сбрасываний гранул крупность 3-5 мм с высоты 300 мм	50/40	52/40	70/40	90/60
7	Содержание (%) по классам крупности окомкованной шихты, мм:				
	+8	5,09	2,40	2,12	1,20
	5-8	42,86	26,50	22,70	24,85
	3-5	37,45	49,60	58,67	41,68
	2-3	9,45	15,45	13,69	24,65
0-2	5,16	7,25	2,82	7,62	
8	Крупность окомкованной шихты, мм: эквивалентная по поверхности средневзвешенная	3,94	3,32	3,75	3,14
		5,08	4,41	4,40	4,10

Таким образом, введение в состав шихты ИПС в штабель в количестве 0,5% взамен извести уменьшало эквивалентную по поверхности крупность шихты на 19,5% отн., в условиях повышения прочности сырых гранул фракции 3-12 мм на 11,9% при их сжатии и 14,2% при их сбрасывании с высоты 300 мм в количестве 10 раз. При агломерации шихты с уменьшенной эквивалентной по поверхности крупности повышался коэффициент сопротивления шихты в среднем на 3,8% отн. В результате удельная производительность агломерационной установки увеличилась на 3,5% при повышении прочности готового агломерата по показателю «сопротивление годного агломерата удару (+5 мм)» на 0,94% отн.

Таблица 3.23

Результаты спеканий аглошихт при замене части извести на интерполимерное связующее (ИПС) в условиях рациональной влажности шихты – 9,5%

№ п/п	Наименование показателей	Содержание ИПС в шихте			
		0	0,5	0,2	0,5
1	Содержание извести, %	3,5	3,0	3,3	3,0
2	Вариант штабеля	зимний		летний	
3	Место ввода ИПС	штабель		барабан - смеситель	
4	Выход годного (по классу +5мм), %	87,2	87,2	88,1	88,2
5	Удельная производительность (по классу + 5 мм), т/(м ² ·час)	1,238	1,287	1,420	1,430
6	Показатели прочности агломерата, %:				
	- сопротивление годного агломерата удару (+5мм)	74,3	75,2	75,5	76,1
	- разрушение годного агломерата (0,5-5мм)	21,9	21,7	21,6	21,3
	- истирание годного агломерата (0-0,5мм)	3,8	3,1	2,9	2,6
7	Скорость спекания, мм/мин	17,7	18,9	19,3	20,0
8	Коэффициент сопротивления сырой шихты	0,48	0,50	0,47	0,48
9	Коэффициент сопротивления шихты в момент зажигания	1,10	1,26	1,11	1,12
10	То же, в момент окончания спекания	0,95	0,86	0,81	1,02
11	То же, в момент окончания опыта	0,37	0,33	0,30	0,32
12	Максимальная температура в вакуум-камере, °С	636,7	570,0	660,0	690,0
11	Химический состав агломерата, %:				
	Fe	57,0	56,5	56,8	56,7
	CaO	12,61	12,68	12,57	12,66
	SiO ₂	7,76	7,92	7,90	7,88
	MgO	2,00	2,11	1,95	2,15
	TiO ₂	0,18	0,18	0,18	0,19
	Al ₂ O ₃	1,21	1,24	1,34	1,28
	MnO	0,17	0,20	0,22	0,19
	Zn	0,02	0,02	0,02	0,02
	Cr	0,019	0,019	0,017	0,020
	S	0,051	0,044	0,048	0,049

Наиболее эффективное использование ИПС наблюдали при его вводе в барабан – смеситель. Ввод 0,5% ИПС в состав шихты взамен извести в барабан-смеситель по сравнению с вводом его в летний штабель обеспечивал:

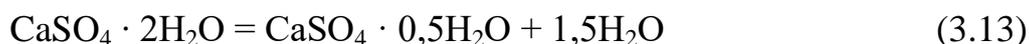
- улучшение процесса окомкования шихты:
 - повысилась сопротивляемость сырых гранул класса 3-12 мм сжатию на 15,7% отн.,
 - увеличился выход фракции +5 мм после 10 сбрасываний гранул крупностью 3-12 мм с высоты 300 мм на 22% отн.;
- повышение показателей агломерационного процесса:
 - удельная производительность агломерационной установки на 1,1% отн.,
 - выход годного (по классу +5мм) на 0,45% отн.

Прочность готового агломерата оставалась на прежнем уровне.

3.4.2 Отходы сероулавливающей установки

Отходы сероулавливающей установки (СУУ) в основном представлены водными сульфатами кальция, то есть их основные минералы относятся к системе $\text{CaSO}_4 - \text{H}_2\text{O}$. В этой системе возможно существование кристаллических структур трёх типов: двуводного сульфата кальция (двуводного гипса), безводного сульфата кальция (безводного гипса) и полуводного сульфата кальция (полуводного гипса) – как фазы переменного состава. Материалы на основе гипса представляют интерес как окомковывающие добавки к агломерационной шихте, поскольку данные материалы используются для производства композиций, обладающих вяжущими свойствами, которые находят широкое применение в строительной отрасли.

При повышении температуры, но не более чем до 180 °С, двуводный сульфат кальция теряет часть воды, переходя в полуводный — так называемый «жжёный гипс», или алебастр, согласно уравнению (3.13):



Полуводный гипс пригоден для применения как вяжущее вещество, поскольку он легко схватывает влагу, переходя обратно в двуводную форму. При дальнейшем нагреве до 220 °С гипс полностью теряет воду, образуя безводный

CaSO_4 (ангидрит), который поглощает влагу очень медленно и лишь при длительном хранении переходит в полугидрат. Если обжиг вести при температуре выше $220\text{ }^\circ\text{C}$, то получается безводный CaSO_4 , который влагу уже не поглощает и не «схватывается» при смешивании с водой (т.н. «мёртвый гипс»). Таким образом, для повышения окомковывающих свойств добавки отходов СУУ было принято решение прокалить ее при разных температурах с получением двух образцов: «алебаstra», с преимущественным содержанием полуводного сульфата кальция, а также второго материала - преимущественно безводного сульфата кальция.

Для идентификации фазового состава исходных отходов СУУ было проведено исследование методом рентгеноструктурного анализа на приборе «SHIMADZU XRD-7000». Согласно данным выполненного рентгеноструктурного анализа, основной фазой отходов СУУ в исходном состоянии является гипс $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; наличия других минеральных фаз в значимых количествах не было зафиксировано.

Для подтверждения результатов рентгеновской дифрактометрии был проведен термический анализ на синхронном термоаналитическом приборе STA (Jupiter 449 F3) фирмы NETZSCH (лаборатория кафедры ЛПиМ МГТУ им. Г.И. Носова). Результаты совместного термогравиметрического и дифференциального калориметрического анализов в воздушной среде представлены на рис. 3.5.

Как видно из рис. 3.5, при нагревании образца до температуры примерно $130\text{ }^\circ\text{C}$ происходит в основном удаление гигроскопической влаги, что подтверждается эндотермическим эффектом на кривой ДСК с максимумом при $72,6\%$. При этом на кривой ТГ отмечаются потери массы материала на величину $1,03\%$.

При дальнейшем повышении температуры происходит резкая дегидратация кристаллических гидратных форм материала с поэтапным обезвоживанием гипса сначала до алебаstra, а затем – и до безводного сульфата кальция. Максимальная скорость обезвоживания материала, соответствующая минимуму на кривой ДТГ, отмечается при температуре $167\text{ }^\circ\text{C}$.

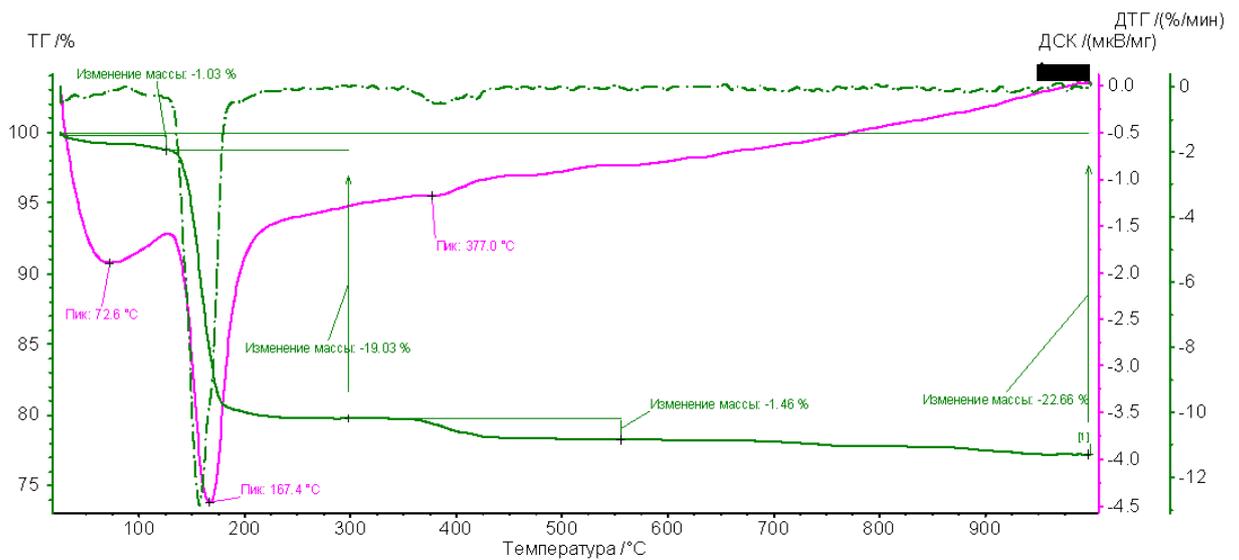


Рисунок 3.5 – Термограмма исходных отходов СУУ: зеленая сплошная линия – термогравиметрическая (ТГ) кривая; зеленая штрихпунктирная линия – дифференциальная термогравиметрическая кривая (ДТГ); фиолетовая линия – кривая дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК)

Дегидратация кристаллических форм системы $\text{CaSO}_4\text{-H}_2\text{O}$ завершается при температуре примерно $230\text{ }^\circ\text{C}$, что довольно близко соответствует теоретической температуре распада полуводного гидрата сульфата кальция ($220\text{ }^\circ\text{C}$). Дегидратация гидратов сульфата кальция подтверждается глубоким эндотермическим эффектом на кривой ДСК с максимумом величины эффекта при температуре $167,4\text{ }^\circ\text{C}$. При дальнейшем повышении температуры образца были отмечены также относительно небольшие по величине ($1,46\%$) потери массы образца в температурном интервале примерно от $360\text{ }^\circ\text{C}$ до $450\text{ }^\circ\text{C}$, по-видимому, соответствующие обезвоживанию гидратированных форм оксидовкальция и магния, обнаруживаемых в составе исходных отходов СУУ в небольшом количестве. Данный этап дегидратации материала подтверждается относительно небольшим по величине минимумом на кривой ДСК при температуре $377,0\text{ }^\circ\text{C}$.

Практика современных гипсовых производств свидетельствует, что, из-за высокой скорости реакции дегидратации, редко удаётся получить гипсовое вяжущее монофазного состава. Как правило, вместе с основной фазой в вяжущем

присутствуют другие фазы. Так, при производстве гипсового вяжущего наряду с полуводным гипсом часто встречается ангидрит и двухводный гипс, соотношение между которыми зависит от тонины помола и продолжительности обжига исходного сырья, содержащего гипс. В данном исследовании для анализа влияния фазового состава системы $\text{CaSO}_4\text{-H}_2\text{O}$ материала добавки отходов СУУ на окомкование агломерационной шихты, с учетом полученных данных рентгеноструктурного и термического анализов, было принято решение прокалить добавку при температуре $160\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 1 ч, для получения преимущественно полуводного сульфата кальция (алебаstra), а затем - при температуре $600\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 1 ч, для получения почти чистого ангидрита (безводного сульфата кальция) с небольшими примесями оксидов кальция и магния и глубоким удалением из материала водных кристаллических фаз.

Результаты окомкования и агломерации шихты в условиях частичной замены извести на отходы СУУ приведены в табл. 3.24 и 3.25.

Исследовали введение отходов СУУ в интервале от 0,1 до 0,5% с шагом 0,1%. Использование отходов СУУ в исходном состоянии и прокаленных при температуре $600\text{ }^\circ\text{C}$ сопровождались снижением прочности окомкованных гранул и удельной производительности агломерационной установки согласно табл. 3.24 и 3.25. Так, выход фракции +5 мм после 5 / 10 сбрасываний гранул крупностью 5-12 мм с высоты 300 мм снизился с 60 / 42% до 55 / 35% при использовании отходов СУУ в количестве от 0,1 до 0,5% в исходном состоянии или прокаленных при $600\text{ }^\circ\text{C}$. Вовлечение в состав шихты отходов СУУ, прокаленных при температуре $600\text{ }^\circ\text{C}$, в среднем в количестве 0,3% обеспечивала незначительное повышение выхода годного агломерата, с 87,6% до 88,0% (на 0,5% отн.), по сравнению с агломератом, спеченным из базовой шихты. При этом, однако, падала удельная производительность агломерационной установки по годному агломерату, с $1,373\text{ т}/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$ до $1,363\text{ т}/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$ (на 0,73% отн.).

Результаты окомкования агломерационной шихты при замене в летнем штабеле части извести на отходы сероулавливающей установки по вариантам: в исходном состоянии, обожженные при температуре 160 и 600 °С в условиях рациональной влажности шихты

№ п/п	Наименование показателей	Вид и содержание отходов сероулавливающей установки, %						
		-	Исходное состояние (0,1-0,5%)	Прокаленные при температуре 160 °С				Прокаленные при температуре 600 °С (0,1-0,5%)
				0,1	0,2	0,3	0,4	
1	Содержание извести, %	3,5	3,3	3,4	3,3	3,2	3,1	3,1
2	Выход фракции +5 мм после 5 / 10 сбрасываний гранул крупностью 5-12 мм с высоты 300 мм, %	60 / 42	55 / 35	60 / 45	65 / 45	60 / 40	55 / 30	55 / 35
3	Выход фракции +3 мм после 5 / 10 сбрасываний гранул крупность 3-5 мм с высоты 300 мм, %	66 / 48	70 / 50	70 / 60	77 / 60	70 / 60	65 / 45	70 / 50
4	Содержание (%) по классам крупности окомкованной шихты, мм:							
	+8	2,46	4,33	3,83	3,49	1,62	1,31	4,33
	5-8	23,96	51,05	40,18	35,87	35,86	21,45	51,05
	3-5	44,54	31,13	42,50	41,14	47,54	47,46	31,13
	2-3	20,94	9,26	7,85	12,98	9,31	19,08	9,26
	0-2	8,09	4,23	5,64	6,52	5,67	10,70	4,23

Таблица 3.25

Результаты спекания аглошихт при замене в летнем штабеле части извести на отходы сероулавливающей установки по вариантам: в исходном состоянии, обожженные при температуре 160 и 600 °С в условиях рациональной влажности шихты

№ п/п	Наименование показателей	Содержание отходов сероулавливающей установки, %						
		0	Исходное состояние (0,1-0,5%)	Прокаленные при t = 160 °С				Прокаленные при t = 600 °С (0,1-0,5%)
				0,1	0,2	0,3	0,4	
1	Влажность шихты, %	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5
2	Выход годного (по классу +5мм), %	87,6	86,7	88,1	88,5	89,0	85,8	88,0
3	Удельная производительность (по классу + 5 мм), т/(м ² ·час)	1,373	1,225	1,380	1,400	1,382	1,360	1,363
4	Показатели прочности агломерата, %:							
	- сопротивление годного агломерата удару (+5мм)	75,5	77,7	76,0	77,5	77,9	77,2	78,6
	- разрушение годного агломерата (0,5-5мм)	21,7	18,8	20,8	19,5	18,8	20,0	18,3
	- истирание годного агломерата (0-0,5мм)	2,9	3,5	3,2	3,1	3,3	2,8	3,2
5	Скорость спекания, мм/мин	19,7	18,1	18,7	19,8	19,6	20,6	18,7
6	Коэффициент сопротивления сырой шихты	0,57	0,50	0,48	0,49	0,46	0,57	0,40
7	Коэффициент сопротивления шихты в момент зажигания	1,27	1,28	1,25	1,14	1,12	1,36	1,20
8	То же, в момент окончания спекания	0,85	0,84	0,79	0,80	0,77	0,86	0,73
9	То же, в момент окончания опыта	0,35	0,32	0,32	0,33	0,33	0,35	0,32
10	Максимальная температура в вакуум-камере, °С	643	645	590	620	615	575	625
11	Химический состав агломерата, %:							
	Fe	57,1	57,0	57,1	57,0	57,0	56,9	56,8
	CaO	12,52	12,50	12,51	12,46	12,49	12,48	12,46
	SiO ₂	7,82	7,84	7,79	7,81	7,84	7,88	7,88
	MgO	2,02	2,06	1,95	2,07	2,00	2,01	2,11
	TiO ₂	0,19	0,18	0,19	0,20	0,18	0,19	0,20
	Al ₂ O ₃	1,24	1,32	1,26	1,29	1,23	1,31	1,22
	MnO	0,15	0,17	0,16	0,19	0,14	0,17	0,18
	Zn	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
	Cr	0,018	0,019	0,019	0,019	0,021	0,018	0,015
	S	0,050	0,052	0,049	0,048	0,048	0,046	0,050

Введение в состав шихты отходов СУУ прокаленных при температуре 160 °С в количестве 0,1% взамен извести незначительно улучшали показатели агломерации. Дальнейшее увеличение доли отходов СУУ до 0,2% обеспечивало улучшение показателей окомкования гранул, агломерации шихты и прочностных свойств готового агломерата:

- выход фракции +5 мм после 10 сбрасываний гранул крупностью 3-12 мм с высоты 300 мм увеличился на 7,1% отн.;
- удельная производительность агломерационной установки по годному агломерату повысилась с 1,373 т/(м²·ч) до 1,400 т/(м²·ч), или на 2,0%;
- выход годного агломерата по классу +5 мм вырос с 87,6% до 88,5%, или на 0,96% отн.; сопротивление годного агломерата удару по содержанию фракции +5 мм после испытания по ГОСТ 15137-77 возросло с 75,5% до 77,5%, или на 2,7% отн.

3.4.3. Бентонит

Результаты окомкования и агломерации шихты в условиях частичной замены извести на бентонит приведены в таблицах 3.26 и 3.27.

Таблица 3.26

Результаты окомкования агломерационной шихты при введении в летний штабель бентонита взамен части извести в условиях рациональной влажности шихты

№ п/п	Наименование показателей	Содержание бентонита, %			
		-	0,1	0,2	0,3
1	Содержание извести фракции 0-3 мм, %	3,5	3,4	3,3	3,2
2	Влажность шихты, %	9,5	9,3	9,3	9,3
3	Выход фракции +5 мм после 5 / 10 сбрасываний гранул крупностью 5-12 мм с высоты 300 мм	60 / 42	65 / 50	60 / 50	50 / 20
4	Выход фракции +3 мм после 5 / 10 сбрасываний гранул крупностью 3-5 мм с высоты 300 мм	66 / 48	65 / 55	90 / 70	90 / 60
5	Содержание (%) по классам крупности окомкованной шихты, мм:				
	+8	2,10	2,53	2,92	3,82
	5-8	24,23	35,24	22,88	42,05
	3-5	45,21	43,62	43,09	42,66
	2-3	19,95	11,93	20,15	7,85
	0-2	8,51	6,67	10,97	3,62

Результаты спеканий аглошихт при введении в летний штабель бентонита взамен части извести в условиях рациональной влажности шихты

№ п/п	Наименование показателей	Содержание бентонита, %			
		-	0,1	0,2	0,3
1	Содержание извести, %	3,50	3,4	3,3	3,2
2	Влажность шихты, %	9,5	9,3	9,3	9,3
3	Выход годного (по классу +5мм), %	87,6	90,4	87,6	87,0
4	Удельная производительность (по классу + 5 мм), т/(м ² ·час)	1,373	1,350	1,321	1,314
5	Показатели прочности агломерата, %:				
	- сопротивление годного агломерата удару (+5мм)	75,5	77,9	79,0	78,0
	- разрушение годного агломерата (0,5-5мм)	21,7	19,3	18,4	19,0
	- истирание годного агломерата (0-0,5мм)	2,9	2,8	2,7	3,0
6	Скорость спекания, мм/мин	19,7	19,6	18,4	19,3
7	Коэффициент сопротивления сырой шихты	0,57	0,51	0,58	0,49
8	Коэффициент сопротивления шихты в момент зажигания	1,27	1,12	1,26	1,08
9	То же, в момент окончания спекания	0,85	0,86	0,76	0,78
10	То же, в момент окончания опыта	0,35	0,32	0,30	0,31
11	Максимальная температура в вакуум-камере, °С	643	655	583	650
12	Химический состав агломерата, %:				
	Fe	57,1	57,0	56,9	56,8
	CaO	12,52	12,61	12,47	12,50
	SiO ₂	7,82	7,86	7,88	7,71
	MgO	2,02	2,14	2,06	2,22
	TiO ₂	0,19	0,16	0,18	0,18
	Al ₂ O ₃	1,25	1,34	1,45	1,67
	MnO	0,15	0,16	0,15	0,16
	Zn	0,02	0,02	0,01	0,02
	Cr	0,018	0,017	0,017	0,017
	S	0,050	0,048	0,046	0,046

Доля бентонита в составе шихты составляла 0,1; 0,2 и 0,3%.

Введение бентонита в количестве 0,1% в состав шихты взамен извести фракции 0-3 мм обеспечивало наиболее высокую величину выхода годного агломерата по классу +5 мм, равную 90,4%, что выше на 2,8% по сравнению с базовым вариантом. При этом удельная производительность уменьшилась на 1,24% отн. в условиях роста сопротивления агломерата удару (+5 мм) на 2,5% отн. Таким образом, с целью увеличения производительности доменных печей дальнейший интерес представляет оценка влияния прочностных показателей агломерата, интервала температуры размягчения на показатели процесса производства чугуна в доменных печах; разработка и обоснование рациональных технологических параметров работы печей при использовании в составе шихты агломерата с различными свойствами для различных сырьевых и газодинамических условий путём проведения промышленных исследований.

3.4.4 Исследование физико-химических свойств агломерата на основе шихт, включающих различные добавочные материалы, после его восстановления под нагрузкой 50 кПа при температурах 500-1100 °С

Сравнили физико-химические свойства агломератов, произведенных из базовой шихты и опытных шихт, полученных введением в состав базовой шихты отдельно ИПС и отходов СУУ, прокаленных при температуре 160 °С, взамен части извести. Химический состав исследуемых агломератов приведен в табл. 3.28

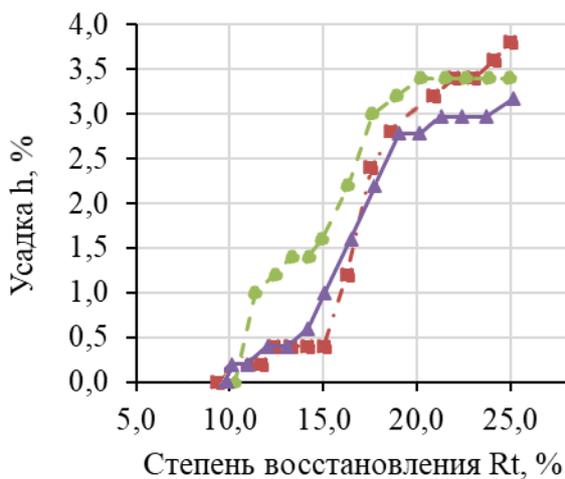
Таблица 3.28

Химический состав агломератов до и после восстановления водородом под статической нагрузкой 50 кПа

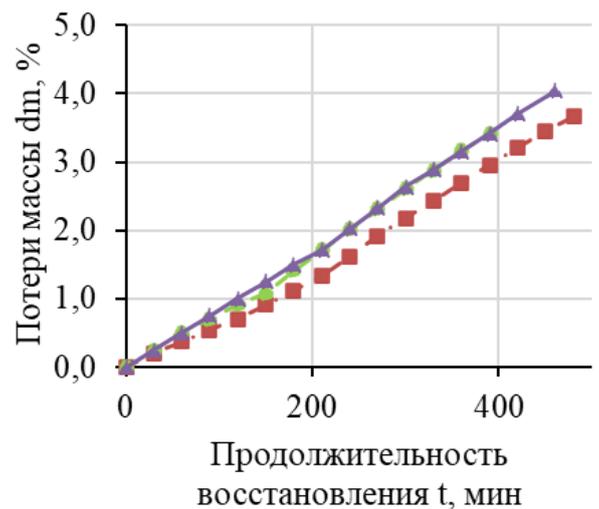
Вид агломерата	Содержание элемента/оксида, %										
	Fe	FeO	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	S	TiO ₂	Zn	Cr	MnO
Базовый исходный	57,1	20,7	12,52	7,82	2,02	1,25	0,050	0,19	0,02	0,018	0,15
Базовый восстановленный	59,3	57,5	13,00	8,12	2,10	1,30	0,052	0,20	0,02	0,019	0,16
С добавкой ИПС в шихту:											
- исходный	56,6	22,5	12,70	7,94	2,08	1,33	0,044	0,18	0,02	0,020	0,22
- восстановленный	58,6	56,9	13,15	7,94	2,09	1,38	0,046	0,19	0,02	0,021	0,23
С добавкой в шихту отходов СУУ, прокаленных при 160 °С:											
- исходный	57,0	17,0	12,46	7,81	2,07	1,29	0,048	0,20	0,01	0,019	0,19
- восстановленный	59,4	57,5	12,98	8,14	2,16	1,34	0,050	0,21	0,01	0,020	0,20

Результаты испытаний физико-химических свойств агломерата на основе шихт, включающих различные добавочные материалы, после его восстановления под нагрузкой 50 кПа при температурах 500-1100 °С приведены в табл. 3.29 и на рис. 3.6.

Увеличенная на 5% абс. степень использования водорода при температуре 700 °С и восстановлении агломерата с применением в составе шихты отходов СУУ, прокаленных при температуре 160 °С, по сравнению с агломератом из добавки ИПС (табл. 3.29) объясняется исходной степенью восстановления материалов. Ее величина составляла 10,3% для агломерата, полученного с использованием для окомкования аглошихты добавки 0,5% ИПС, и 7,7% для агломерата, полученного с использованием для окомкования аглошихты добавки 0,2% прокаленных при 160 °С отходов СУУ.



(а)



(б)

Рисунок 3.6 – Изменение усадки образца h , %, в зависимости от абсолютной степени восстановления агломерата R_t , %, (а); потери массы образца агломерата dm , %, в зависимости от продолжительности восстановления t , мин, (б).

Обозначения: базовая известь (—■—); ИПС 0,5% (—●—); отходы СУУ, прокаленные при температуре 160 °С, 0,2% (—▲—)

Таблица 3.29

Изменение физико-химических свойств агломератов с добавками новых связующих материалов при восстановлении под нагрузкой 50 кПа при температурах 700 и 1100 °С

№ п/п	Показатели	Вид агломерата		
		Базовый	С добавкой ИПС в шихту	С добавкой в шихту отходов СУУ, прокаленных при 160 °С
1	Продолжительность восстановления (мин) до достижения заданной степени восстановления Rt (%): Rt = 15% Rt = 25%	220	160	220
		500	410	480
2	Скорость восстановления (%O ₂ /мин) при температуре T (°C) и степени восстановления, Rt (%): T = 700 °C; Rt = 15% T = 1100 °C; Rt = 25%	0,02564	0,02956	0,03318
		0,03571	0,04000	0,03846
3	Средняя степень использования водорода, %, при температуре T, °C: T = 700 °C T = 1100 °C	30,5	34,1	39,1
		42,0	47,0	42,0
4	Изменение газопроницаемости агломерата по перепаду давления в слое ΔP, кПа, на разных этапах эксперимента: Этап 1. Агломерат при комнатной температуре	0,01	0,01	0,01
	Этап 2. T = 700 °C, начало изотермической выдержки (Rt = 7%)	0,18	0,16	0,16
	Этап 3. T = 700 °C, окончание изотермической выдержки (Rt = 15%)	0,22	0,18	0,18
	Этап 4. T = 1100 °C, начало изотермической выдержки (Rt = 15%)	0,30	0,28	0,26
	Этап 5. T = 1100 °C, окончание изотермической выдержки (Rt = 25%)	0,34	0,31	0,30

В условиях отсутствия на изотермическом участке 1100 °С различий в исходных степенях восстановления, степень использования водорода для агломерата, полученного с применением ИПС, по сравнению со степенью использования водорода для агломерата, полученного с применением отходов СУУ, было выше на 1,8% абс (табл. 3.29).

В среднем введение в состав шихты добавочных материалов обеспечило повышение средней степени использования водорода на конец исследования на 14,1%.

Ввод в состав агломерационной шихты добавочных материалов способствовал снижению перепада давления газа в слое материалов при температуре 700 и 1100 °С, степени восстановления соответственно 15 и 25% в среднем на 10,2% отн. Наиболее низкую величину перепада давления газа наблюдали в условиях его прохождения через слой агломерата, имеющего в составе шихты отходы СУУ. Причиной высокой газопроницаемости такого агломерата могла стать повышенная его горячая прочность по сравнению с другими образцами при температурах 700 °С и степени восстановления 15%, низкая величина усадки (рис. 3.6) при температурах 1100 °С и степени восстановления 25%.

Из табл. 3.28 следует, что испытываемые агломераты отличаются по содержанию $Fe_{\text{общ}}$. У базового агломерата его содержание составляло 57,1%. Добавка в аглошихту отходов СУУ, прокаленных при температуре 160 °С, обеспечивало его содержание на уровне 57%. При добавке ИПС содержание общего железа составляло 56,6%. В случае агломерата, полученного с добавкой в аглошихту 0,2% отходов СУУ, не отмечено повышения содержания серы, по сравнению с базовым агломератом. Повышенное содержание FeO (22,5%) в агломерате, полученном с использованием ИПС, может быть обусловлено дополнительным количеством восстановителя, поступающим в составе добавки на основе органических соединений. В случае агломерата, полученного с использованием отходов СУУ, прокаленных при температуре 160 °С, снижение

уровня исходного FeO (17,0%) относительно базы (20,7%) объясняется затратами части тепла на эндотермические восстановительные процессы, связанные с разложением сульфата кальция, при спекании. Поскольку в данном экспериментальной серии использовали значения абсолютной степени восстановления, то ее начальные значения, определяемые исходным содержанием FeO составили соответственно 9,36% для базового агломерата, 10,27% для агломерата, полученного с использованием для окомкования аглошихты добавки 0,5% ИПС, и 7,70% - для агломерата, полученного с использованием для окомкования аглошихты добавки 0,2% прокаленных при 160 °С отходов СУУ.

Степень восстановления базового агломерата составляла 0,02564% O₂/мин при температуре процесса 700 °С и 0,03571% O₂/мин при температуре t = 1100 °С (табл. 3.29). Введение в состав шихты добавочных материалов обеспечивало повышение скорости восстановления агломератов в среднем в 1,16 раза.

При степени восстановления 15% усадка базового агломерата составляла 0,4% (рис. 3.6 (а)). Применение добавочных материалов обеспечивало повышение величины усадки при данной величине восстановления. Для агломерата, спеченного с добавкой ИПС, величина усадки составляла 1,6%, для агломерата, спеченного с добавкой отходов СУУ, прокаленных при температуре 160 °С, величина усадки составляла 1,0%.

При степени восстановления 25% усадка базового агломерата составляла 3,8%. Применение добавочных материалов обеспечивало уменьшение величины усадки при данной величине восстановления. Для агломерата, спеченного с добавкой ИПС, величина усадки составляла 3,4%, для агломерата, спеченного с добавкой отходов СУУ, прокаленных при температуре 160 °С, величина усадки составляла 2,8%.

Повышенная усадка агломерата, полученного с использованием ИПС, при температуре 700 °С может объясняться тем, что при данной температуре не происходит заметного размягчения всех изученных образцов, а характер возникновения усадки связан с потерей прочности твердого восстановленного

материала в точках контакта кусков агломерата и обусловленного этим хрупкого разрушения. Относительно высокая восстановимость агломерата, полученного с использованием ИПС, а также его тонкопористая структура, обусловленная измельчающим воздействием добавки на гранулы при окомковании шихты, приводят к повышенной хрупкости в точках контакта между кусками агломерата и дают в результате повышенную усадку образца. В случае испытаний при этой же температуре агломерата, полученного с использованием отходов СУУ, повышенная восстановимость также увеличивает усадку, по сравнению с базовым агломератом, но крупнопористая структура данного агломерата не способствует его хрупкому разрушению в точках контакта между кусками, поэтому для данного образца усадка принимает промежуточное значение.

При температуре 1100 °С вклад фактора размягчения в усадку агломерата возрастает, по сравнению с температурой 700 °С, и порядок изменения усадки образцов на данном изотермическом участке меняется. Роль скорости восстановления и характера пористой структуры агломерата снижается, и более легко восстанавливаемые опытные агломераты демонстрируют меньшие значения усадки, по сравнению с базой [10,153].

При производстве агломерата из тонкозернистой шихты, полученной с использованием 0,5% ИПС, происходило формирование материала, пронизанного сетью мелких пор, имеющих тонкие стенки, которые относительно легко деформируются при повышенных температурах, поэтому данный агломерат продемонстрировал большую усадку, по сравнению со вторым опытным агломератом при температуре 1100 °С. В случае агломерата, полученного с использованием отходов СУУ, прокаленных при 160 °С, из более крупных гранул формировались относительно устойчивые к восстановлению и воздействию статической нагрузки блоки и перемычки. В результате усадка агломерата, полученного с использованием в качестве окомковывающей добавки отходов СУУ, прокаленных при температуре 160 °С, закономерно показала наименьшее среди испытываемых агломератов значение.

Таким образом, введение в состав шихты добавочных материалов обеспечивало:

- увеличенную скорость восстановления в 1,16 раза;
- уменьшенный перепад давления газа в слое на 10,2%;
- меньшую усадку слоя на 18,4% отн.;
- увеличенную степень использования водорода на 14% отн.

Выводы по главе 3

1. Проведено физическое моделирование агломерационного процесса и испытаний свойств лабораторных агломератов, а также выполнена математическая обработка полученных результатов

2. Замещение концентрата ССГПО на Михайловский стандартный сопровождалось снижением следующих показателей агломерации в лабораторных условиях:

- производительность лабораторной аглоустановки – на 4,5%;
- выход годного агломерата (по классу +5 мм) – на 2,5% отн.;
- выход класса +5 мм после испытания по ГОСТ 15137-77 – на 1,1% (отн.).

3. Использование в составе аглошихты флотоконцентрата Михайловского ГОК взамен стандартного концентрата обеспечивает повышение следующих параметров агломерации на лабораторной установке:

- удельная производительность агломерационной установки – 9,2%;
- выход годного агломерата из его спёка – 0,8% (отн.);
- выход фракции +5 мм после испытания по ГОСТ 15137-77 – 0,9% (отн.).

4. Агломерация смеси концентратов, включающей 70% Лебединского и 30% Михайловского взамен моноконцентрата Михайловского ГОК в условиях сохранения на уровне 19% доли смеси аглоруд, содержащей 73% Михайловской и 27% Богословской, обеспечивали изменение показателей агломерации в лабораторных условиях:

- производительность лабораторной аглоустановки увеличилась на 4,6%;
- выход годного агломерата (по классу +5 мм) уменьшился на 0,5% отн.;

- выход фракции +5 мм после испытания по ГОСТ 15137-77 увеличился на 7,2% (отн.).

5. Переход от смеси концентратов 70% Михайловского и 30% Лебединского на 100% Лебединского концентрата обеспечил изменение следующих параметров агломерации на лабораторной установке:

- повышение удельной производительности аглоустановки на 9,0%;
- снижение выхода фракции +5 мм после испытания по ГОСТ 15137-77 на 1,1% (отн.);
- уменьшение выхода годного агломерата из его спёка на 0,34% отн.

6. Смесь, содержащая Лебединский и Михайловский флотационный концентраты в соотношении 50/50, обеспечила максимальную для данной пары концентратов удельную производительность лабораторной аглоустановки по годному агломерату (1,505 т/(м²·ч)) при относительно высоком выходе годного агломерата, равном 85,5%, и прочностные характеристики спека по показателю СУ₊₅ на уровне 75,7%. Замена стандартного Михайловского концентрата на флотационный для данной смеси обеспечила изменение следующих параметров агломерации на лабораторной установке:

- повышение удельной производительности агломерационной установки – 9,1%;
- увеличение выхода годного агломерата из его спёка – 1,3% (отн.);
- уменьшение выхода фракции +5 мм после испытания по ГОСТ 15137-77 – 4,7% (отн.).

7. Проведением лабораторных экспериментов выявили рациональную смесь агломерационных руд, включающую 50% Стойленской и по 25% Михайловской и Богословской. Спекание ее в смеси со стандартным Михайловским концентратом обеспечивало получение следующих технико-экономических показателей процесса агломерации:

- удельная производительность лабораторной агломерационной установки по годному агломерату (фракция +5 мм) – 1,406 т/(м²·ч);
- выход годного агломерата (фракция +5 мм) – 86,4%;

- сопротивление годного агломерата удару по содержанию фракции +5 мм после испытания по ГОСТ 15137-77 –78,4%.

По сравнению с усредненными показателями качества агломерата, произведенного из моноруд Михайловского, Богословского и Стойленского ГОКов в смеси со стандартным Михайловским концентратом, рациональная смесь аглоруд обеспечивала повышение удельной производительности лабораторной аглоустановки на 6,2%, выход годного агломерата – на 2,5% (отн.) и сопротивление годного агломерата удару по содержанию фракции +5 мм после испытания по ГОСТ 15137-77 – на 3,9% (отн.).

8. Производство агломерата на основе рациональной смеси аглоруд с заменой стандартного Михайловского концентрата на флотационный, обеспечивало повышение технико-экономических показателей агломерационного процесса:

- удельная производительность лабораторной агломерационной установки по годному агломерату (фракция +5 мм) – на 10,2%;
- выход годного агломерата (фракция +5 мм) – на 0,7% отн.;
- сопротивление годного агломерата удару по содержанию фракции +5 мм после испытания по ГОСТ 15137-77 – на 3,2% отн.

9. Лабораторные спекания шихт на основе рациональной смеси концентратов, включающей 70% Михайловского стандартного и 30% Лебединского при общей их доле 72,2%, и рациональной смеси аглоруд, содержащей аглоруды Михайловскую, Богословскую и Стойленскую в соотношении 25/25/50 соответственно при общей доле смеси аглоруд 19,0%, обеспечили изменение показателей агломерационного процесса и качества агломерата, по сравнению с шихтой на основе моноконцентрата Михайловского ГОК и рациональной смеси агломерационных руд – Михайловская, Богословская и Стойленская в соотношении соответственно 25/25/50:

- удельная производительность лабораторной агломерационной установки по годному агломерату увеличилась с 1,369 до 1,438 т/(м²·ч) (на 5,0%);

- выход годного агломерата по классу +5 мм вырос с 84,3 % до 84,6 % (на 0,4% (отн.));

- сопротивление годного агломерата удару по содержанию фракции +5 мм после испытания по ГОСТ 15137-77 увеличилось с 75,5% до 80,2% (на 6,2% (отн.)).

10. Введение в состав шихты на основе рациональных концентратов (70% Михайловский и 30% Лебединский с долей их от рудной части шихты – 72,2%) руды Бапы с долей 50% от массы смеси руд взамен части Михайловской аглоруды обеспечивало положительное влияние на показатели агломерационного процесса:

- повышение удельной производительности лабораторной агломерационной установки - на 7,67%;

- повышение выхода годного агломерата - на 0,36% (отн.);

- повышение сопротивления годного агломерата удару по содержанию фракции +5 мм после испытания по ГОСТ 15137-77 – на 5,0% (отн.).

11. Исследовали возможность введения в состав агломерационной шихты аглофабрики №5 ПАО «ММК» различных разновидностей Туканской руды. Шихта, включающая от 10% до 50% Туканской руды II фабрики (исходная фракция до дробления – 40-100 мм), на основе концентрата ССГПО обеспечивала, по сравнению с шихтой на основе базовой смеси аглоруд, следующие изменения показателей:

- рост удельной производительности лабораторной агломерационной установки с 1,366 т/(м²·ч) до 1,467-1,469 т/(м²·ч) (в среднем на 7,5%);

- снижение показателя сопротивления годного агломерата удару с 75,3% до 74,2-74,4% (в среднем на 1,0% (абс.));

- снижение выхода годного агломерата с 87,5% до 83,2-85,4% (в среднем на 3,2% (абс.)).

12. Использование новых окомковывающих добавок в агломерационную шихту (интерполимерное связующее, термообработанные отходы сероулавливающей установки, бентонит) с выявленными рациональными расходами взамен части извести обеспечило следующее повышение показателей

агломерации: выхода годного агломерата по классу +5 мм – на 1,7% отн., удельной производительности агломерационной установки по годному агломерату – на 1,1%, сопротивления годного агломерата удару в холодном состоянии по содержанию класса +5 мм после испытания по ГОСТ 15137-77 – на 1,9% отн.

13. Введение окомковывающей добавки на основе отходов СУУ, прокаленных при 160 °С, в агломерационную шихту в количестве 0,2% от ЖРС взамен части извести обеспечивало улучшение показателей окомкования гранул, агломерации шихты и прочностных свойств готового агломерата, по сравнению с базовым опытом, проводимым с добавкой 3,5% извести от массы ЖРС:

- выход фракции +5 мм после 10 сбрасываний гранул крупностью 3-12 мм с высоты 300 мм увеличился на 7,1% отн.;
- выход годного агломерата по классу +5 мм вырос с 87,6% до 88,5%, или на 0,96% отн.;
- удельная производительность агломерационной установки по годному агломерату повысилась с 1,373 т/(м²·ч) до 1,400 т/(м²·ч), или на 2,0%;
- сопротивление годного агломерата удару по содержанию фракции +5 мм после испытания по ГОСТ 15137-77росло с 75,5% до 77,5%, или на 2,7% отн.

Полученный агломерат после восстановления при температуре 1100 °С до степени восстановления 25,0% характеризовался усадкой на 14,3% отн. ниже, в сравнении с усадкой агломерата, полученного из базовой шихты с использованием извести. В результате увеличения горячей прочности было отмечено повышение снижения перепада давления в слое восстановленного агломерата на 11,2%. Восстановление агломерата, полученного с использованием добавки в шихту 0,2% отходов СУУ, прокаленных при 160 °С, завершалось быстрее, по сравнению с агломератом, полученным на основе базовой шихты с добавкой в ЖРС только извести.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ АГЛОМЕРАЦИОННЫХ МАШИН ФАБРИКИ № 5 ПАО «ММК» НА РАЗРАБОТАННОМ РАЦИОНАЛЬНОМ СЫРЬЕ

4.1 Составы штабелей железорудного сырья в исследуемые периоды работы агломашин

Работу агломашин на фабрике №5 ПАО «ММК» исследовали по трем периодам. Компонентный состав железорудной части агломерационной шихты в изучаемые периоды представлен в табл. 4.1.

Согласно представленным данным, в базовом периоде I продолжительностью 1303 л-час агломерационные машины работали на шихте, включавшей концентраты ССГПО, Лебединского и Михайловского ГОКов с долями соответственно 97,0%; 1,5%; 1,6% от массы смеси концентратов при общей доле смеси концентратов на уровне 72,2% от массы ЖРС. Смесь агломерационных руд была представлена Михайловской, Стойленской, Богословской и Сосновской рудами с долями от массы смеси аглоруд в интервалах 45,6%; 7,6%; 12,0%; 34,8% соответственно. Общая доля смеси агломерационных руд составляла 19,0% от массы ЖРС. Доля добавочных материалов составляла 8,8% от массы ЖРС.

В базовом периоде II продолжительностью 1282 л-часа основой смеси железорудных концентратов являлся концентрат Михайловского ГОК, входящий в смесь в количестве 46,3% от её массы, в то время как индивидуальные доли остальных четырех концентратов, ССГПО, Лебединского, Ковдорского и Стойленского, не превышали 24,3% от массы смеси концентратов. Общая доля смеси концентратов в данном периоде снизилась до 68,7% от массы ЖРС. В то же время доля смеси аглоруд выросла до 20,0% от массы ЖРС. Смесь включала Стойленскую, Михайловскую и Богословскую руды с содержаниями 48,5%; 33,8% и 17,7% от массы смеси аглоруд. Доля добавок в шихте выросла до 11,3% от массы ЖРС.

Таблица 4.1

Средний месячный компонентный состав штабелей железорудных смесей в исследуемых периодах

Период	База I	База II	Опытный
Продолжительность периода, л-часы	1303	1282	1111
Концентраты, % от массы ЖРС / % от массы смеси концентратов:			
ССГПО	70,0/97,0	6,5/9,5	-
Лебединского ГОК	1,1/1,5	11,9/17,3	23,8/32,9
Михайловского ГОК	1,1/1,6	31,8/46,3	46,4/64,0
Ковдорского ГОК	-	16,7/24,3	0,4/0,5
Стойленского ГОК	-	1,8/2,6	-
Оленегорского ГОК	-	-	1,9/2,6
Смесь ЦПАШ	-	-	-
Итого концентратов	72,2/100,0	68,7/100,0	72,5/100,0
Аглоруды, % от массы ЖРС / % от массы смеси аглоруд:			
Михайловского ГОК	8,7/45,6	6,8/33,8	11,5/55,9
Стойленского ГОК	1,4/7,6	9,7/48,5	-
Богословского РУ	2,3/12,0	3,5/17,7	-
Рудника «Сосновский»	6,6/34,8	-	-
Месторождения Бапы	-	-	9,1/44,1
Итого аглоруд	19,0/100,0	20,0/100,0	20,6/100,0
Добавочные материалы, % от массы ЖРС / % от массы смеси добавок:			
Аглодобавка	-	-	-
Металлоконцентрат	-	1,7/15,1	-
Отсев Лебединских окатышей	4,8/54,6	4,8/42,8	2,8/40,9
Известь	4,0/45,4	4,8/42,1	4,0/59,1
Итого добавочных материалов	8,8/100,0	11,3/100,0	6,8/100,0

В периоде 3 (опытном) продолжительностью 1111 л-часов доля смеси концентратов поднялась до 72,5% от массы ЖРС. Основой смеси являлись концентраты Лебединского и Михайловского ГОКов, взятые в количествах соответственно 32,9 и 64,0% от массы смеси концентратов. Индивидуальная доля остальных концентратов (смесь ЦПАШ, концентраты Ковдорского и Оленегорского ГОКов) в данном периоде не превышала 2,6% от массы смеси концентратов. Доля смеси аглоруд составляла 20,6% от массы ЖРС; смесь состояла из руды Михайловского ГОК и магнезиальной руды месторождения Бапы, взятых в соотношении 55,9 / 44,1. Доля добавочных материалов в этом периоде составляла 6,8% от массы ЖРС.

Средний месячный химический состав ЖРС в исследуемых периодах приведен в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Средний месячный химический состав железорудной смеси
в исследуемых периодах

Период	База I	База II	Опытный
Продолжительность периода, л-часы	1303	1282	1111
Содержание в ЖРС, %:			
Fe _{общ}	59,7	59,0	61,1
FeO	23,6	21,8	22,8
Fe ₂ O ₃	59,13	60,22	62,13
SiO ₂	6,23	6,94	7,82
Al ₂ O ₃	1,57	1,04	0,33
CaO	4,71	4,75	3,20
MgO	1,29	1,52	1,37
P	0,018	0,024	0,015
S	0,504	0,263	0,076
MnO	0,163	0,150	0,059
TiO ₂	0,189	0,289	0,02
Zn	0,007	0,010	0,005
Cr	0,005	0,008	0,005
W	3,1	3,9	4,6
Основность по CaO/SiO ₂ , ед.	0,760	0,712	0,406

В базовом периоде I содержание общего железа в ЖРС составляло 59,7%. В базовом периоде II наблюдалось снижение доли железа в ЖРС до 59,0%, а в опытном периоде содержание железа выросло до 61,1%.

Содержание оксида магния в ЖРС в базовом периоде I составляло в среднем 1,29% и обеспечивалось в основном за счет концентрата ССГПО, содержащего в этот период от 1,11 до 1,29% оксида магния. В базовом периоде II содержание оксида магния в ЖРС возросло до 1,52%, несмотря на замену концентрата ССГПО на низкомагнезиальные Лебединский и Михайловский концентраты, поскольку в этом периоде в смеси использовали также Ковдорский концентрат с содержанием 16,7% от массы ЖРС, в котором присутствовала магnezия на уровне от 5,12% до 5,26%.

В опытном периоде обеспечили уровень оксида магния в ЖРС на уровне 1,37% введением магнезиальной агломерационной руды Бапы, содержащей от 4,85 до 8,40% MgO.

Содержание серы в ЖРС снижалось с 0,504% в периоде I до 0,263% в базовом периоде II и далее до 0,076% в опытном периоде. Основными источниками серы в ЖРС в базовых периодах I и II являлись: концентрат ССГПО ($S = 0,303-0,509\%$), Сосновская аглоруда ($S = 1,610-2,280\%$), Богословская аглоруда ($S = 2,470-2,960\%$).

Основность ЖРС по отношению CaO/SiO_2 в базовых периодах I и II находилась на уровне 0,712-0,760 ед., а в опытном периоде резко снизилась до 0,406 ед., за счет увеличения доли «кислых» концентратов Лебединского и Михайловского ГОКов.

Средний месячный химический состав сырой агломерационной шихты в исследуемые периоды приведен в табл. 4.3. Как видно из представленных данных, содержание общего железа в шихте монотонно снижалось при переходе от базового периода I к базовому периоду II и далее к опытному периоду соответственно с 52,9% до 52,2% и далее до 49,8%. Снижение железа в шихте в опытном периоде, по сравнению с базовыми периодами I и II, объясняется разубоживанием за счет дополнительного флюсования известняком при возрастании основности шихты по CaO/SiO_2 с 1,598-1,683 ед. в базовых периодах I и II до 1,923 ед. в опытном периоде. В то же время за счет снижения общего железа в шихте содержание оксида железа (III) Fe_2O_3 также снизилось, с 54,95-55,34% в базовых периодах I и II до 53,09% в опытном периоде, в результате чего удалось снизить расход коксика.

Содержание серы в шихте снижалось при переходе от базового периода I к базовому периоду II и далее к опытному периоду соответственно с 0,402% до 0,243% и далее до 0,083%. Концентрация оксида титана снижалась при переходе от базовых периодов I и II к опытному периоду с 0,170-0,236% до минимальных значений, на уровне 0,001%.

Гранулометрический состав ЖРС и сырой окомкованной шихты представлен в табл. 4.4. В базовом периоде I на долю тонкой фракции 0-0,5 мм в ЖРС приходилось 77,8%, в базовом периоде II и опытном периоде доля этой фракции последовательно росла до 78,0% и 78,6% соответственно. Аналогично росла доля мелочи 0-3 мм с 88,4% в периоде I до 89,3% в базовом периоде II и далее до 89,9% в опытном периоде III. Поскольку тонкие фракции имеют решающее влияние на среднюю эквивалентную по поверхности крупность, то величина этой крупности закономерно снижалась от 0,3117 мм в периоде I до 0,3104 мм в периоде II и далее до 0,3075 мм в опытном периоде.

Таблица 4.3

Средний химический состав сырой агломерационной шихты в исследуемых периодах

Период	База I	База II	Опытный
Содержание в аглошихте, %:			
Fe _{общ}	52,9	52,2	49,8
FeO	18,6	17,4	16,4
Fe ₂ O ₃	54,95	55,34	53,09
SiO ₂	5,42	6,20	6,43
Al ₂ O ₃	1,49	1,07	0,40
CaO	9,12	9,87	12,30
MgO	1,85	1,83	2,09
P	0,017	0,022	0,015
S	0,402	0,243	0,083
MnO	0,147	0,128	0,041
TiO ₂	0,170	0,236	0,001
Zn	0,009	0,012	0,006
Cr	0,005	0,006	0,004
W	7,0	7,2	7,2
Основность по CaO/SiO ₂ , ед.	1,683	1,598	1,923

Основные изменения в гранулометрическом составе сырой окомкованной агломерационной шихты при переходе от базового периода I к базовому периоду II и далее к опытному периоду заключались в следующем:

1. доля класса 3-5 мм снизилась с 13,5-14,7% (базовые периоды I и II) до 10,7% (опытный период);
2. доля класса 0,5-1 мм возросла с 7,3-8,1% (базовые периоды I и II) до 12,9% (опытный период);

3. доля тонкой фракции 0-0,5 мм возросла с 30,8-31,1% (базовые периоды I и II) до 32,6% (опытный период).

В результате в опытном периоде наблюдалось снижение средней эквивалентной по поверхности крупности сырой окомкованной аглошихты до значения в 0,5903 мм, что на 7,5% меньше, по сравнению со значением средней эквивалентной по поверхности крупности сырой окомкованной аглошихты в базовом периоде I (0,6381 мм) и на 6,8% меньше, по сравнению со значением этой крупности в базовом периоде II (0,6337 мм).

Таблица 4.4

Средний гранулометрический состав железорудной смеси и сырой окомкованной агломерационной шихты в исследуемых периодах

Период	База I	База II	Опытный
Содержание (%) в ЖРС класса крупности, мм:			
+8	3,9	3,8	2,9
5-8	4,3	3,7	3,8
3-5	3,3	3,2	3,4
1-3	7,5	7,8	7,2
0,5-1	3,1	3,5	4,2
0-0,5	77,8	78,0	78,6
0-3	88,4	89,3	89,9
Средняя эквивалентная по поверхности крупность ЖРС, мм	0,3117	0,3104	0,3075
Содержание (%) в сырой окомкованной аглошихте класса крупности, мм:			
+8	3,4	3,4	2,3
5-8	8,8	8,5	5,0
3-5	13,5	14,7	10,7
1-3	35,5	34,9	36,4
0,5-1	8,1	7,3	12,9
0-0,5	30,8	31,1	32,6
0-3	74,4	73,4	81,9
Средняя эквивалентная по поверхности крупность сырой окомкованной аглошихты, мм	0,6381	0,6377	0,5903

4.2 Показатели работы агломашин

Средние основные технико-экономические показатели работы агломашин фабрики №5 ПАО «ММК» в исследуемых периодах приведены в табл. 4.5. Показатели технологического режима работы машины представлены в табл. 4.6.

Таблица 4.5

Средние технико-экономические показатели работы
агломашин фабрики №5 в исследуемых периодах

Период	База I	База II	Опытный
Продолжительность периода, л-часы	1303	1282	1111
Календарное время, ленто-часы	744	720	744
Простои, ч	93	80	120
Чистое (горячее) время, ленто-часы	652	641	625
Высота слоя, мм	630	610	623
Заданный расход возврата, %	28,7	28,2	24,2
Заданный расход кокса, %	3,9	3,4	3,6
Скорость ленты агломашины, м/мин	2,25	2,19	2,12
Произведено, т:			
- годного агломерата (+5 мм)	220528	209354	211901
- возврата (0-5 мм)	111808	106470	95943
- постели (10-20 мм)	26108	26849	26613
Расход шихты, т	358443	344497,5	334355
Выход годного агломерата (+5 мм), %	61,5	60,8	63,4
Фактический выход возврата (0-5 мм), %	31,2	30,9	28,7
Выход постели (10-20 мм), %	7,3	7,8	8,0
Расходный коэффициент по сырью, т сухой шихты/т агломерата	1,625	1,646	1,578
Производительность агломашины, тонн в горячий ленто-час	338,7	326,8	339,6

Таблица 4.6

Технологические показатели работы агломашин в исследуемых периодах

Период	База I	База II	Опытный
Продолжительность периода, л-часы	1303	1282	1111
Температура горна, °С	1124	1094	1131
Разрежение, кПа:			
коллектор №1	16,1	15,3	12,3
коллектор №2	15,9	15,5	12,5
Температура отходящих газов перед электрофильтрами, °С:			
коллектор №1	131	129	119
коллектор №2	136	131	119
Расход воды, м ³ /ч:			
в барабан-смеситель	31,6	28	30,0
в барабан-окомкователь	4,3	4,0	4,2
Распределение воды на операции смешения/окомкования	88/12	88/12	88/12
Температура воды, °С	65,5	63,6	71,6
Температура в 19-й вакуум-камере, °С:			
коллектор №1	280	272	273
коллектор №2	285	270	278
Температура подогретой шихты, °С	36,3	39,3	40,8
Температура агломерата, °С	17,4	26,6	7,3

При работе в базовом периоде I простои агломашин составляли в среднем 12,5% от календарного времени, в базовом периоде II их доля возросла до 13,2%, а в опытном периоде – до 16,1% от календарного времени. На чистое («горячее») время в периодах I, II и III приходилось 87,5; 86,8 и 83,9% от календарного времени соответственно. Высота слоя шихты в базовом периоде I поддерживалась неизменной на уровне 630 мм, в базовом периоде II ее снизили до 610 мм, в опытном периоде высота слоя составила 623 мм.

Спекания вели при среднем заданном уровне содержания углерода 3,9% в базовом периоде I, 3,4% углерода в базовом периоде II и 3,6% углерода в опытном периоде. Заданный расход возврата сокращали с 28,7% в среднем в базовом периоде I до 28,2% в базовом периоде II и далее до 24,2% в опытном периоде, поскольку фактический выход фракции 0-5 мм уменьшался с 31,2% в базовом периоде I до 30,9% в базовом периоде II и далее до 28,7% в опытном периоде.

Среднюю скорость ленты агломерационной машины снижали при переходе от базового периода I к базовому периоду II и далее к опытному периоду с 2,25 м/мин до 2,19 м/мин и далее до 2,12 м/мин соответственно, поскольку при переходе от базового периода I к базовому периоду II снижалась вертикальная скорость спекания шихты, что отмечалось по снижению средней температуры в 19-й вакуум-камере с 282,5 °С (базовый период I) до 271 °С (базовый период II). После внедрения рациональной шихты в опытном периоде было отмечено повышение средней температуры в 19-й камере до 276,5 °С, несмотря на то, что по технологическим причинам (затруднение работы газоочистки) открытие направляющего аппарата эксгаустера в этом периоде было неполным и поддерживалось на уровне 70%, поэтому разрежение составляло в среднем 12,4 кПа против 15,4-16,0 кПа в базовых периодах I и II. Таким образом, в опытном периоде обозначился дополнительный резерв для повышения производительности за счет повышения скорости аглоленты и восстановления уровня разрежения в вакуум-камерах за счет изменения режима работы эксгаустера.

В базовых периодах I и II, согласно табл. 4.5, наблюдались близкие значения выхода годного агломерата по фракции +5 мм, который составлял в эти периоды 60,8-61,5% (61,2% в среднем) и 61,3% соответственно. В опытном периоде выход годного агломерата возрос до 63,4% за счет рационализации шихтового состава и иных технологических мероприятий. В итоге снизился фактический выход агломелочи фр. 0-5 мм, с 30,9-31,2% (базовые периоды I и II) до 28,7% (опытный период), и долю возврата в шихте уменьшили с 28,2-28,7% до 24,2% соответственно. В результате в сырой шихте в среднем на 3,4% (абс.) снизилось количество крупной фракции 3-5 мм (табл. 4.4), что внесло значительный вклад в снижение средней эквивалентной по поверхности крупности сырой окомкованной аглошихты в опытном периоде. Производительность агломерационных машин при переходе от базового периода I к базовому периоду II снижалась с 338,7 т/гор. л-ч до 326,8 т/гор. л-ч (на 3,5%), однако в опытном периоде вновь увеличилась до 339,6 т/гор. л-ч, что выше на 0,27%, по сравнению с базовым периодом I, и на 3,9%, по сравнению с базовым периодом II.

4.3 Качество агломерата в исследуемые периоды

Химический состав и основные показатели качества агломерата в исследуемые периоды работы агломашин приведены в табл. 4.7. В базовом периоде I получаемый агломерат содержал 56,6% общего железа при содержании оксида железа FeO на уровне 10,00%. В базовом периоде II уровень железа в агломерате снизили до 55,4%, а в базовом периоде III – до 54,4%, при этом содержание оксида FeO также снижалось, до 8,56% и 7,92% соответственно.

В новых сырьевых условиях упало содержание в агломерате оксидов алюминия и марганца пустой породы, по сравнению с базовым периодом I: в базовом периоде II на 32,5% и на 12,5%; в опытном периоде – в 4,7 раза и 3,2 раза соответственно. После внедрения рациональной шихты в опытном периоде снизилось также содержание оксидов фосфора, цинка и хрома, по сравнению с базовым периодом II, при одновременном повышении уровня серы.

Основность агломерата по отношению CaO/SiO_2 в базовом периоде I составляла от 1,671 ед., в базовом периоде II эта величина незначительно выросла до 1,673 ед., а в опытном периоде основность агломерата повысили до 1,885 ед. Задаваемая основность агломерата в данном случае была обусловлена сырьевыми условиями доменного цеха.

Таблица 4.7

Качество агломерата фабрики №5 в исследуемых периодах ежемесячно

Период	База I	База II	Опытный
Продолжительность периода, л-часы	1303	1282	1111
Содержание общего железа, %	56,6	55,4	54,4
Содержание, %:			
Fe_2O_3	69,8	69,8	69,0
$\text{Fe}_{\text{общ}}$	56,6	55,4	54,4
FeO	10,00	8,56	7,92
CaO	10,11	11,26	13,25
SiO_2	6,05	6,73	7,03
MgO	1,97	2,14	2,27
Al_2O_3	1,63	1,10	0,35
TiO_2	0,19	0,27	-
MnO	0,16	0,14	0,05
P	0,019	0,025	0,018
S	0,049	0,051	0,059
Zn	0,013	0,013	0,010
Cr	0,007	0,010	0,005
C	0,056	0,039	0,070
Основность по CaO/SiO_2 , ед. (ДЦ)	1,671	1,673	1,885
Содержание фр. 0-5 мм, % (ДЦ)	5,6	5,5	6,0

Среднее содержание мелкой фракции 0-5 мм по результатам рассевов в доменном цехе составляло 5,6% в базовом периоде I, в базовом периоде II оно снизилось до 5,5%, а в опытном периоде вновь повысилось до 6,0%.

По результатам проведенных испытаний разработанная рациональная смесь шихтовых материалов, включающая рациональные соотношения железорудных концентратов различных производителей и аглоруд различных месторождений, внедрена в производство на агломерационной фабрике №5 ПАО «ММК», о чем имеется акт внедрения (Приложение А). Изменения внесены в технологическую инструкцию ТИ 101-ГОП-7-2023.

Выводы по главе 4

1. Проведены промышленные испытания на агломашинах №1 и №2 фабрики №5 ПАО «ММК» спеканием выявленной рациональной шихты, содержащей 32,9% концентрата Лебединского ГОК и 64,0% концентрата Михайловского ГОК от массы смеси концентратов при общей их доле в сухой шихте 72,5%, а также 44,1% аглоруды месторождения Бапы и 55,9% аглоруды Михайловского ГОК от массы смеси аглоруд при общей их доле 20,6 % от массы сухой шихты.

2. Спекание рациональной шихты обеспечило следующие изменения параметров агломерации:

В сравнении с периодом, характеризующимся спадом основных технико-экономических показателей агломерационного процесса и качества получаемого агломерата:

- Выход годного агломерата по классу +5 мм вырос с 60,8 до 63,4% (на 4,3% (отн.));

- Средняя производительность агломашин по годному агломерату фракции +5 мм повысилась с 326,8 т/гор. л-ч до 339,6 т/гор. л-ч (на 3,9%).

В сравнении с периодом работы на концентрате ССГПО, наблюдались следующие изменения:

- Выход годного агломерата по классу +5 мм вырос с 61,5 до 63,4% (на 3,1% (отн.));

- Средняя производительность агломашин по годному агломерату фракции +5 мм повысилась с 338,7 т/гор. л-ч до 339,6 т/гор. л-ч (на 0,27%).

3. Применительно к агломерационной фабрике №5 ПАО «ММК» внедрена разработанная рациональная смесь шихтовых материалов, включающая рациональные соотношения железорудных концентратов различных производителей и аглоруд различных месторождений. Изменения внесены в технологическую инструкцию ТИ 101-ГОП-7-2023.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Физическим и математическим моделированием получены новые зависимости, отражающие влияние состава двойных и тройных смесей концентратов и агломерационных руд на показатели процесса и качества агломерата, в виде набора уравнений множественной регрессии и тройных диаграмм. Индивидуальные решения данных уравнений позволили сформировать ряд рациональных по разным признакам смесей железорудных материалов. Наиболее высокие показатели удельной производительности лабораторной аглочаши по годному агломерату ($1,550 \text{ т}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$) и сопротивления годного агломерата удару (80,9 %), были достигнуты в случае состава, включающего Стойленскую, Богословскую и Михайловскую аглоруды в соотношении 50/25/25 на основе Михайловского флотационного концентрата.

2. Установлены рациональные смеси концентратов для современных шихтовых условий ПАО «ММК», обеспечивающие эффективную замену ушедшего с рынка РФ концентрата ССГПО. Смесь, включающая 70 % Михайловского и 30 % Лебединского концентратов, обеспечила эквивалентную замену по удельной производительности лабораторной аглоустановки ($\text{УП}_{+5} = 1,367 \text{ т}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$) моноконцентрату ССГПО ($\text{УП}_{+5} = 1,366 \text{ т}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$) при одновременном росте сопротивления годного агломерата удару на 4,6 % (отн.) и снижении выхода годного агломерата на 2,5 % (отн.)

3. Рассмотрена возможность расширения железорудной базы ПАО «ММК» за счет использования в составе шихты местной аглоруды Туканского месторождения, (Башкортостан). Шихта, включающая от 10 % до 50 % Туканской руды с содержанием железа 50,6 %, обеспечила, по сравнению с шихтой на основе базовой смеси аглоруд, состоящей из Богословской и Михайловской руд, взятых в соотношении 73/27, повышение удельной производительности лабораторной установки по годному агломерату в среднем на 7,5 % в условиях снижения его сопротивления удару в среднем на 1,3 % (отн.)

4. Выявлены пути повышения показателей агломерационного процесса и качества агломерата введением окомковывающих добавок взамен части извести. Применительно к шихтовым условиям агломерационных фабрик ПАО «ММК» введение окомковывающих добавок – интерполимерного связующего или бентонита с рациональным расходом соответственно 0,5 и 0,1 % от массы ЖРС, уменьшило коэффициент сопротивления сырой окомкованной шихты в среднем на 13,2 %. Повышение показателей работы было следующим: выход годного агломерата – 1,7 % (отн.), удельная производительность – 1,1 %, сопротивление агломерата удару в холодном состоянии – 1,9 % (отн.)

5. Разработан научно обоснованный режим термоподготовки комкующей добавки в аглошихту на основе отходов сероулавливающей установки (СУУ) с выявлением рационального расхода. Введение её в количестве 0,2-0,3 % от массы ЖРС взамен части извести позволило повысить следующие показатели: выход годного агломерата – на 1,8 % (отн.), удельную производительность – на 1,5 %, прочность на удар в холодном состоянии – на 2,3 % (отн.)

6. Исследованы физико-химические свойства слоя агломерата, полученного с использованием в шихте новой связующей добавки на основе термически подготовленных отходов СУУ в количестве 0,25 % взамен части извести, в условиях восстановления его при температуре 1100 °С под статической нагрузкой 50 кПа до достижения степени восстановления 20-25 %. Усадка слоя уменьшилась на 14,3 % (отн.), перепад давления газа в нем снизился на 11,2 %, в сравнении с базовым опытом, в котором испытывали лабораторный агломерат, полученный из шихты с содержанием извести 3,5 %.

7. Промышленными испытаниями на агломашинах №1 и №2 фабрики №5 ПАО «ММК» подтверждена эффективная замена концентрату ССГПО посредством разработанной рациональной шихты, включающей концентраты Михайловского и Лебединского ГОКов, аглоруд Михайловского ГОК и месторождения Бапы. Внедрение результатов в производство позволило увеличить производительность агломерационных машин на 0,27 % от уровня периода работы их на концентрате ССГПО.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

SFCA-фаза - фаза силикоферритов алюминия-кальция;

АО – акционерное общество; но Еврейская АО – Еврейская автономная область;

БРУ – Бакальское рудоуправление;

ВГ₊₅ – выход годного агломерата из его спека по содержанию класса +5 мм после первичного дробления;

ГМК – горно-металлургический комплекс;

ГМП – горно-металлургическое предприятие;

ГОК – горно-обогажительный комбинат;

гор. л-ч – «горячий» («чистый») ленто-час, единица измерения продолжительности непрерывной работы ленты агломерационной машины

ГОП – горно-обогажительное производство;

ГОСТ – государственный отраслевой стандарт;

ДСК-кривая – кривая дифференциальной сканирующей калориметрии;

ДТГ-кривая – дифференциальная термогравиметрическая кривая;

ЖРС – железорудная смесь;

ЗСМК – Западно-Сибирский металлургический комбинат;

И_{0,5} – истирание годного агломерата, по содержанию класса 0-0,5 мм после испытания в барабане по ГОСТ 15137-77;

ИПС – интерполимерное связующее;

ИСО (ISO) – Международная организация по стандартизации; также обозначение издаваемых данной организацией стандартов;

ИЧМ – Институт черной металлургии им З.М. Некрасова Академии наук Украины;

КМА – Курская магнитная аномалия;

ЛПиМ – кафедра литейных процессов и материаловедения МГТУ им. Г.И. Носова;

л-ч – ленто-час, единица измерения продолжительности работы ленты агломерационной машины;

МГТУ им. Г.И. Носова – Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова;

МиХТ – кафедра металлургии и химической технологии МГТУ им. Г.И. Носова;
МК – металлургический комбинат;
ММК – Магнитогорский металлургический комбинат;
НПП – научно-производственное предприятие;
ОАО – открытое акционерное общество;
ООО – общество с ограниченной ответственностью;
ПАО – публичное акционерное общество;
R_{0,5-5} – разрушение годного агломерата, по содержанию класса 0,5-5 мм после испытания в барабане по ГОСТ 15137-77;
РУ – рудоуправление;
РФ – Российская Федерация;
СКО – среднее квадратичное отклонение;
СО – стандартный образец;
ССГПО – Соколовско-Сарбайское горно-производственное объединение;
СУ₊₅ – сопротивление годного агломерата удару, по содержанию класса +5 мм после испытания в барабане по ГОСТ 15137-77;
СУУ – сероулавливающая установка;
ТГ-кривая – термогравиметрическая кривая;
ТИ – технологическая инструкция;
ТИРП – температурный интервал размягчения-плавления;
ТНЖ – тягонапоромер жидкостной;
УП₊₅ – удельная производительность агломерационной установки/агломашины по годному агломерату класса +5 мм;
ФО – федеральный округ;
ХА-термопара – хромель-алюмелевая термопара, термопара К-типа;
ХК – холдинговая компания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Распоряжение Правительства РФ от 28.12.2022 № 4260-р «О Стратегии развития металлургической промышленности Российской Федерации на период до 2030 года» // Собрание законодательства РФ. - 2023. - № 1. - ст. 421.
2. World Steel Statistics in Figures 2022. World Steel Association. <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/World-Steel-in-Figures-2022.pdf>
3. Леонтьев, Л.И. Проблемы развития металлургической отрасли для обеспечения технологического суверенитета России с учётом состояния минерально-сырьевой базы / Л.И. Леонтьев, О.В. Заякин, А.И. Волков // Вестник Российской академии наук. – 2023. – Т. 93, № 7. – С. 631-645. – DOI 10.31857/S086958732307006X.
4. Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2021 году» / под ред. А.П. Данилова, Л.А. Дорожкиной, О.Н. Ефановой [и др.]. – М. : ФГБУ «ВИМС», 2022. – 622 с.
5. Пелевин, А.Е. Тонкое грохочение и его место в технологии обогащения железных руд / А.Е. Пелевин // Горный журнал. – 2011, №4. – С. 110-117
6. Промышленное производство. Производство основных видов продукции в натуральном выражении (оперативные данные) / Федеральная служба государственной статистики (Росстат). М., 2023.
URL: https://rosstat.gov.ru/enterprise_industrial
7. Леонтьев, Л.И. Сырьевая и топливная база черной металлургии : уч. пособие для ВУЗов / Л.И. Леонтьев, Ю.С. Юсфин, Т.Я. Малышева [и др.]. – М. : ИКЦ «Академкнига», 2007. – 304 с.
8. Орлов, В.П. Железорудная база России / под ред. В.П. Орлова, М.И. Веригина, Н.И. Голивкина. – М. : ЗАО «Геоинформмарк», 1998. – 842 с.
9. Пирометаллургическая переработка высокотитанистых руд / А.Н. Дмитриев, Г.Ю. Витькина, Р.В. Алекторов // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2020. – № 12 (76). – С. 1219-1229.

10. Рошин, В.Е. Физика пирометаллургических процессов / В.Е. Рошин, А.В. Рошин. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2021 г. – 304 с.
11. Горная промышленность Дальнего Востока России: специфика и проблемы / Ю.А. Архипова, Р.Г. Леонтьев // Известия Уральского государственного горного университета. – 2021. – № 3 (63). – С. 156-164
12. Исследование технологии переработки титаномагнетитовых руд Суроямского месторождения / М.В. Потапова М.В., В.А. Бигеев, А.С. Харченко, М.Г. Потапов, Е.В. Соколова // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2020. – № 3-4 (63). – С. 225 – 230
13. Получение гематитового концентрата из гематит-магнетитовых руд / А.Е. Пелевин // ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – №1 (3). – С. 422-430
14. Базилевич, С.В. Агломерация / С.В. Базилевич, Е.Ф. Вегман. – М : Металлургия, 1967. – 368 с.
15. Некрасов, З.И. Изменение свойств агломерата и окатышей в процессе восстановительно-тепловой обработки / З.И. Некрасов, Н.А. Гладков, Г.М. Дозоров [и др.] // Сб. Металлургия чугуна. № 1. – М. : Металлургия, 1973. – С. 24-36.
16. Вегман, Е.Ф. Теория и технология агломерации / Е.Ф. Вегман. – М. : Металлургия, 1974. – 288 с.
17. Шурхал, В.А. Внешний нагрев при агломерации / В.А. Шурхал. – Киев : Наукова думка, 1985. – 192 с.
18. Коротич, В.И. Агломерация рудных материалов / В.И. Коротич, Ю.А. Фролов, Г.Н. Бездежский. – Екатеринбург : ГОУ ВПО «УГТУ-УПИ», 2003. – 400 с.
19. Коршиков, Г.В. Качество агломерата и возврата на различных стадиях обработки спека. / Г.В. Коршиков // Сталь.– 1988. – № 12. – С.118-123.
20. Малышева, Т.Я. Эволюция фазового состава и микроструктуры агломерата в интервале основности от 1,1 до 3,1 / Т.Я. Малышева, Ю.С. Юсфин, М.Ф. Гибадулин [и др.] // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2006. – № 4.

21. Фролов, Ю.А. Агломерация: технология, теплотехника, управление, экология / Ю.А. Фролов. – М.: Metallurgizdat, 2016. – 672 с.
22. Сибагатуллин, С.К. Исследование влияния ввода железомagneзиальной руды в агломерационную шихту на показатели доменной плавки / С.К. Сибагатуллин, А.С. Харченко, С.Р. Миникаев, У.Ж. Игликова, А.А. Полинов, Д.Н. Гушин // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2020. – № 9 (76). – С. 910-919. – <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2020-9-910-919>
23. Сибагатуллин, С.К. Повышение содержания железа в агломерате изменением соотношения концентратов ОАО «ММК» и Лебединского ГОК по лабораторным исследованиям / С.К. Сибагатуллин, Д.Н. Гушин, А.С. Харченко, В.А. Гостенин, К.В. Сенькин // Теория и технология металлургического производства. – 2014. – № 1 (14). – <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-soderzhaniya-zheleza-v-aglomerate-izmeneniyem-sootnosheniya-kontsentratoov-oao-mmk-i-lebedinskogo-gok-po-laboratornym>
24. Патент № 2304626 С1 Российская Федерация, МПК С22В 1/243. Шихта для производства агломерата : № 2005135603/02 : заявл. 16.11.2005 : опубл. 20.08.2007 / Р.С. Тахаутдинов, А.И. Гамей, М.Ф. Гибадулин, С.К. Сибагатуллин [и др.] ; заявитель Открытое акционерное общество "Магнитогорский металлургический комбинат".
25. Патент № 2628947 С Российская Федерация, МПК С22В 1/16, С22В 1/243. Способ агломерации железорудных материалов : № 2016122289 : заявл. 03.06.2016 : опубл. 23.08.2017 / Д.Р. Ганин, В.Г. Дружков, А.А. Панычев, А.Н. Шаповалов
26. Авторское свидетельство № 1258857 А1 СССР, МПК С22В 1/16. Способ повышения газопроницаемости слоя шихты : № 3895382 : заявл. 12.05.1985 : опубл. 23.09.1986 / Н.В. Панишев, А.Г. Неясов, А.А. Харитонов [и др.] ; заявитель Магнитогорский горно-металлургический институт им. Г.И. Носова.
27. Коротич, В.И. Теоретические основы окомкования железорудных материалов / В.И. Коротич. – М. : Металлургия, 1966. – 150 с.

28. Пузанов, В.П. Структурообразование из мелких материалов с участием жидких фаз / В.П. Пузанов, В.А. Кобелев. – Екатеринбург, 2001. – 634 с.
29. Кривенко, С.В. Оптимальный гранулометрический состав окомкованной агломерационной шихты / С.В. Кривенко, В.П. Тарасов // *Металлургические процессы и оборудование*. – 2012. – № 4 (30). – С. 4-10.
30. Рощин, В.Е. Физика процессов окисления и восстановления металлов в твердой фазе / В.Е. Рощин, А.В. Рощин // *Металлы*. – 2015. – № 3. – С. 19-25.
31. Дмитриев, А.Н. Основы теории и технологии доменной плавки / А.Н. Дмитриев, Н.С. Шумаков, Л.И. Леонтьев, О.П. Онорин. – Екатеринбург : УрО РАН, 2005. – 545 С.
32. Шумаков, Н.С. Сырые материалы и топливо доменной плавки : характеристика и методы подготовки / Н.С. Шумаков, А.Н. Дмитриев, О.Г. Гараева. – Екатеринбург : УрО РАН, 2007. – ISBN 5-7691-1833-4.
33. Бабарыкин, Н.Н. Теория и технология доменного процесса: уч. пособие / Н.Н. Бабарыкин. – Магнитогорск : ГОУ ВПО «МГТУ», 2009. – 257 с.
34. Вегман, Е.Ф. *Металлургия чугуна : учебник для ВУЗов*. 3-е изд., переработ. и доп. / Под ред. Ю.С. Юсфина. – М. : ИКЦ «Академкнига, 2004. – 774 с.
35. Sibagatullin, S. K. Assessment of Nonuniform Batch Distribution in Blast Furnace / S.K. Sibagatullin, A.S. Kharchenko // *Steel in Translation*. – 2018. – No. 10 (48). – P. 624-630. – DOI 10.3103/S0967091218100108.
36. Харченко, А.С. Закономерности поступления компонентов шихты по крупности из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи в зависимости от условий загрузки / А.С. Харченко // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. – 2018. – № 3 (16). – С. 46-56. – DOI 10.18503/1995-2732-2018-16-3-46-56.
37. Пыхтеева, К.Б. Анализ особенностей формирования порций и истечения материалов из бункера БЗУ при загрузке шихты / К.Б. Пыхтеева, С.А. Загайнов, Б.С. Тлеугабулов [и др.] // *Сталь*. – 2008. – № 6. – С. 14–19.

38. Воронцов, В.В. К вопросу о распределении шихтовых материалов по окружности колошника доменной печи / В.В. Воронцов, А.Т. Степанов // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2010. – № 1. – С. 129–133.
39. Товаровский, И.Г. Прогнозная оценка влияния шихтовых материалов по радиусу колошника на процессы и показатели доменной плавки / И.Г. Товаровский // Metallurg. – 2014. – № 8. – С. 46-52.
40. Zhao, H. Uneven distribution of burden materials at blast furnace top with parallel bunkers / H. Zhao, M. Zhu, P. Du. // ISIJ International. – 2012. – No. 12 (52). – pp. 2177-2185.
41. Харченко, А.С. Закономерности поступления компонентов шихты по крупности из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи в зависимости от условий загрузки / А.С. Харченко // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2018. – № 3 (16). – С. 46-56.
42. Фролов, Ю.А. Состояние и перспективы развития технологии производства агломерата Часть 7. Качество агломерата. / Ю.А. Фролов // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2017. – № 10. – С. 40-53.
43. Рябчиков, М.Ю. Контроль качества металлургического агломерата с использованием модели восстановимости / М.Ю. Рябчиков, В.В. Гребенникова, Е.С. Рябчикова // Сталь. – 2014. – № 2. – С. 4-8.
44. Сибгатуллин, С. К. Металлургические свойства железорудного сырья / С.К. Сибгатуллин, А.С. Харченко. – Магнитогорск : Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2018. – 158 с. – ISBN 978-5-9967-1436-0.
45. Вязникова, Е.А. Некоторые особенности минералогического состава железорудных агломератов / Е.А. Вязникова, А.Н. Дмитриев, Г.Ю. Витькина, Р.В. Алекторов, Л.А. Овчинникова // В сборнике: Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР. Труды научно-практической конференции с международным участием

и элементами школы молодых ученых: 65-летию ИМЕТ УрО РАН. – Екатеринбург, 2020. – С. 195-198.

46. Vitkina, G.Y. Study of the main metallurgical characteristics of iron ore raw materials (sinter and pellets) / G.Y. Vitkina, A.N. Dmitriev, R.V. Alektorov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – Nizhny Tagil, 2020. – P. 012061. – DOI 10.1088/1757-899X/966/1/012061.

47. Сибгатуллин, С.К. Качество шихтовых материалов доменной плавки, включающих титаномагнетиты и сидериты / С.К. Сибгатуллин, А.С. Харченко. – Магнитогорск : Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2012. – 150 с. – ISBN 978-5-9967-0328-9.

48. Некрасов, З.И. Требования к металлургическим свойствам агломерата и окатышей / З.И. Некрасов, Н.А. Гладков, Л.А. Дрожилов // Сборник науч. трудов ин-та «Уралмеханобр». Окускование железных руд и концентратов : Свердловск, 1977. – № 4. – С. 21-24.

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

50. ГОСТ 15137-77. Руды железные и марганцевые, агломераты и окатыши. Метод определения прочности во вращающемся барабане. – М. : Ордена «Знак Почета» Издательство стандартов, 1987. – 7 с.

51. ГОСТ 19575-84 Руды железные, агломераты и окатыши. Метод определения прочности в процессе восстановления. – М. : Ордена «Знак Почета» Издательство стандартов, 1984. – 8 с.

52. ГОСТ 21707-76. Руды железные, агломераты и окатыши. Метод определения газопроницаемости и усадки слоя при восстановлении. – М. : Ордена «Знак Почета» Издательство стандартов, 1984. – 8 с.

53. ГОСТ 17212-84. Руды железные, агломераты и окатыши. Метод определения восстановимости. – М. : Ордена «Знак Почета» Издательство стандартов, 1985. – 9 с.

54. Мигуцкий Л.Р., Лихорадов А.П., Малюта Д.И. [и др.] // Сталь. – 1967. – № 1. – С. 4-8
55. Schmidt H. // Hutnicke listy, 1973, v. 28, №1, pp. 9-13
56. Dmitriev, A.N. Analytical study of quality influence of titanomagnetite raw materials on blast furnace indicators / A.N. Dmitriev // Izvestiya Ferrous Metallurgy. – 2017. – № 8 (60). – pp. 609-615.
57. Sibagatullin, S.K. Improvement of iron ore burden components distribution when charging into blast furnace top by physical and mathematical modeling of fixed effects / S.K. Sibagatullin, A.S. Kharchenko, L.D. Devyatchenko, V.L. Steblyanko // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. – 2017. – № 4 (52). – pp. 694-701.
58. Kharchenko, A.S. Blast furnace performance improved through optimum radial distribution of materials at the top while changing the charging pattern / S.K. Sibagatullin, A.S. Kharchenko, G.Yu. Savchenko, V.A. Beginyuk // CIS Iron and Steel Review. – 2018. – Vol. 16. – pp. 11-14. – DOI: 10.17580/cisisr.2018.02.02
59. Lyalyuk, V.P. Uniformity of blast-furnace parameters over the perimeter / V.P. Lyalyuk, D.A. Kassim, I.G. Tovarovskii // Steel in Translation. – 2018. – № 3 (48). – pp. 179-184.
60. Товаровский, И.Г. Прогнозная оценка влияния шихтовых материалов по радиусу колошника на процессы и показатели доменной плавки / И.Г. Товаровский // Metallurg. – 2014. – № 8. – С. 46-52.
61. Сибэгатуллин, С.К. Выявление рационального режима загрузки коксового орешка в доменную печь компактным загрузочным устройством лоткового типа / С.К. Сибэгатуллин, А.С. Харченко, Г.Н. Логачев // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2016. – № 9 (1401). – С. 56-64.
62. Chukin, M.V. Influence of coke nut introduction in blast furnace charge on melting parameters / M.V. Chukin, S.K. Sibagatullin, A.S. Kharchenko [et al.] // CIS Iron and Steel Review. – 2016. – Vol. 12. – pp. 9-13. – DOI 10.17580/cisisr.2016.02.02.

63. Sibagatullin, S.K. The rational mode of nut coke charging into the blast furnace by compact trough-type charging device / S.K. Sibagatullin, A.S. Kharchenko, G.N. Logachev // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2016. – No. 1-4 (86). – pp. 531-537. – DOI 10.1007/s00170-015-8184-x.
64. Сибэгатуллин, С.К. Оценка неравномерности распределения шихтовых материалов в доменной печи / С.К. Сибэгатуллин, А.С. Харченко, Л.Д. Девятченко // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. – 2018. – № 10 (61). – С. 766-773. – DOI 10.17073/0368-0797-2018-10-766-773.
65. Харченко, Е.О. Исследование влияния минерального структурообразования на металлургические свойства железорудных агломератов: дис. канд. техн. наук : 05.16.02 / Харченко Елена Олеговна. – Магнитогорск, 2021. – 126 с
66. Sibagatullin, S.K. Quality comparison of coke nuts / S.K. Sibagatullin, A.S. Kharchenko, E.O. Teplykh [et al.] // *Coke and Chemistry*. – 2012. – No. 2 (55). – pp. 62-65. – DOI 10.3103/S1068364X12020044.
67. Spirin, N.A. Improving metallurgical information systems: blast-furnace applications / N.A. Spirin, V.V. Lavrov, O.P. Onorin, [et al.] // *Steel in Translation*. – 2019. – No 2 (49). – pp. 118-122.
68. Roshchin, V.E. Electron mechanism of reduction processes in blast and ferroalloy furnaces / V.E. Roshchin, A.V. Roshchin // *CIS Iron and Steel Review*. – 2019. – Vol. 17. – pp. 14-24.
69. Roshchin, V.E. The electronic theory of reduction and the extraction of metals from ore / V.E. Roshchin, P.A. Gamov, A.V. Roshchin, S.P. Salikhov // *Steel in Translation*. – 2019. – No 5 (49). – pp. 319-327.
70. Tovarovskii, I.G. Features of temperature and concentration fields during pig and cast iron smelting in a blast furnace workspace / I.G. Tovarovskii, A.E. Merkulov // *Metallurgist*. – 2016. – No 5-6 (60). – pp. 589-593.
71. Тарасов, В.П. Газодинамика доменного процесса / В.П. Тарасов. – М. : Металлургия, 1990. – 216 с.

72. Tarasov, V.P. Gas dynamics of a granular bed / V.P. Tarasov, S.V. Krivenko // *Steel in Translation*. – 2014. – № 5 (44). – pp. 359-362.
73. Стефанович, М.А. Закономерности движения шихты и газа в доменной печи : монография / М.А. Стефанович, С.К. Сибгатуллин, Д.Н. Гушин. – Магнитогорск : МГТУ им. Г. И. Носова, 2011. – 162 с. – ISBN 978-5-9967-0205-3.
74. ГОСТ 25732-88. Руды железные и марганцевые, концентраты, агломераты и окатыши. Методы определения истинной, объемной, насыпной плотности и пористости. – М. : Издательство стандартов, 1989. – 11 с.
75. ГОСТ 2409-95. Огнеупоры. Метод определения кажущейся плотности, открытой и общей пористости, водопоглощения. – М. : ИПК Издательство стандартов, 2002. – 8 с.
76. Sibgatullin, S.K. Physico-mechanical properties of the sinter of various chemical composition / S.K. Sibgatullin, A.S. Kharchenko, V.I. Sysoev, D.N. Gushin // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – Nizhny Tagil, 2020. – P. 012033. – DOI 10.1088/1757-899X/966/1/012033.
77. Сибгатуллин, С.К. Определяющие процессы и зоны доменной печи / С.К. Сибгатуллин, А.С. Харченко, В.В. Бултаков [и др.] // *Творческое наследие В.Е. Грум-Гржимайло: история, современное состояние, будущее : сб. докл. Международной научно-практической конференции*. – Екатеринбург: ФГОУ ВПО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», 2014. – С. 411-118.
78. Сибгатуллин, С.К. Совершенствование хода доменного процесса повышением расхода природного газа по газодинамике в верхней ступени теплообмена / С.К. Сибгатуллин, А.С. Харченко, В.А. Бегинюк [и др.] // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. – 2017. – № 1 (15). – С. 37-44. – DOI 10.18503/1995-2732-2017-15-1-37-44.
79. Сибгатуллин, С.К. Совершенствование доменного процесса за счет создания условий для увеличения потребления природного газа применением сырья повышенной прочности / С.К. Сибгатуллин, А.С. Харченко, В.П. Чернов, В.А. Бегинюк // *Черные металлы*. – 2017. – № 8. – С. 27-33.

80. Тонких, Д.А. Совершенствование режимов загрузки и дутья на доменных печах ПАО МК “Азовсталь” / Д.А. Тонких, С.А. Кариков, А.К. Тараканов [и др.] // *Металлург.* – 2013. – № 9. – С. 42–48.
81. Bahgat, M. Blast furnace operating conditions manipulation for reducing coke consumption and CO₂ emission / M. Bahgat, K.S. Abdel Halim, H.A. El-Kelesh, M.I. Nasr // *Steel Research International.* – 2012. – № 7 (83). – pp. 686-694.
82. Bahgat, M. Enhancement of wüstite reducibility in blast furnace: Reaction kinetics and morphological changes / M. Bahgat, K.S. Abdel Halim, H.A. El-Kelesh, M.I. Nasr // *Ironmaking and Steelmaking.* – 2012. – № 5 (39). – pp. 327-335.
83. Павлов, А.В. Работа доменных печей ОАО "ММК" с высокой долей окатышей в шихте. Часть 2 / А.В. Павлов, О.П. Онорин, Н.А. Спиринов, А.А. Полинов // *Металлург.* – 2016. – № 7. – С. 15-19.
84. Дмитриев, А.Н. Математическое моделирование доменного процесса / А.Н. Дмитриев. – Екатеринбург: УРО РАН, 2011. – 162 с.
85. Онорин, О.П. Оценка формы зоны вязкопластичных масс железорудных материалов в доменной печи методом математического моделирования / О.П. Онорин, Н.А. Спиринов, В.В. Лавров [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия.* – 2013. – № 6. – С. 24-29.
86. Берсенева, И.С. Методика оценки качества железорудного агломерата по его химическому составу / И.С. Берсенева, В.И. Клейн, В.И. Матюхин, Ю.Г. Ярошенко // *Известия вузов. Черная металлургия.* – 2009. – № 10. – С. 3-6.
87. Влияние основности шихты, включающей новый флотационный концентрат Михайловского ГОК, на агломерационный процесс и качество агломерата / В. И. Сысоев, Г. З. Магасумов, А. В. Дзюба [и др.] // *Технологии металлургии, машиностроения и материалобработки.* – 2022. – № 21. – С. 20-30
88. Нечкин, Г.А. Исследование влияния минерального структурообразования на металлургические свойства железорудных агломератов : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.16.02 / Нечкин Георгий Александрович. – Екатеринбург, 2015. – 22 с.
89. Тарасов, В.П. Свойства агломератов разной основности / В.П. Тарасов,

С.В. Кривенко, Г.Г. Божков // Сталь. – 2015. – № 1. – С. 2-5

90. Sibagatullin, S.K. A development of the adaptive technology of sinter production at PJSC MMK / S.K. Sibagatullin, A.S. Kharchenko, A.S. Savinov, D.N. Gushchin, I.P. Mazur // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. – 2018. – No. 5 (53). – pp. 990–994.

91. Honeyands, T. Variation in Iron Ore Sinter Mineralogy with Changes in Basicity / T. Honeyands, TBT Nguyen, D. Pinson [et al.] // Minerals. – 2022. – No. 10 (12). – p. 1249. – <https://doi.org/10.3390/min12101249>

92. Утков, В.А. Высокоосновный агломерат / В.А. Утков. – М : Metallurgy, 1977. – 156 с.

93. Li, T. The effects of MgO and Al₂O₃ behaviours on softening–melting properties of high basicity sinter / T. Li, Ch. Sun, X. Liu, S. Song, Qi Wang // Ironmaking & Steelmaking. – 2018. – No. 8 (45) – pp. 755-763. – DOI:10.1080/03019233.2017.1337263

94. Sibagatullin, S.K. Aspects of Sintering the Magnesian Iron Ore Concentrate in Blends with Magnetite Concentrates / S.K. Sibagatullin, A.S. Kharchenko, D.N. Gushchin, V.I. Sysoev, D.I. Alekseev // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. – 2021. – No. 5 (56). – pp. 1089-1101

95. Влияние расхода железорудного концентрата магнезиального на показатели агломерационного процесса при спекании его в смеси с магнетитовым концентратом / Д. Н. Гушин, А. С. Харченко, В. И. Сысоев, С. К. Сибатуллин // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования : Тезисы 80-й международной научно-технической конференции, Магнитогорск, 18–22 апреля 2022 года. Том 1. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2022. – С. 83

96. Panigrahy, S.C. Influence of MgO addition on mineralogy of iron ore sinter / S.C. Panigrahy, P. Verstraeten, J. Dilewijns // Metall Trans B. – 1984. – No. 15. – pp. 23–32. – <https://doi.org/10.1007/BF02661059>

97. Леонтьев Л.И., Ватолин Н.А., Шаврин С.В., Шумаков Н.С. Пирометаллургическая переработка комплексных руд. – М.: Metallurgia, 1997. 431 с
98. Смирнов Л.А., Дерябин Ю.А., Шаврин С.В. Metallургическая переработка ванадийсодержащих титаномагнетитов. – Челябинск: Metallurgia, 1990. 256 с
99. Определение рациональных параметров агломерации титаномагнетитовых руд Суоямского месторождения / А. С. Харченко, С. К. Сибатуллин, В. И. Сысоев, С. В. Осолков // Черные металлы. – 2022. – № 12. – С. 10-16. – DOI 10.17580/chm.2022.12.02
100. Разработка технологии спекания агломерата из концентратов Суоямского месторождения / Д. Н. Гушин, С. К. Сибатуллин, В. И. Сысоев, А. С. Харченко // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования : Тезисы докладов 77-й международной научно-технической конференции, Магнитогорск, 22–26 апреля 2019 года. Том 1. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2019. – С. 95
101. К выбору влажности агломерационной шихты и содержания в ней углерода при спекании титаномагнетитовых концентратов / Д. Н. Гушин, С. К. Сибатуллин, А. С. Харченко, В.И. Сысоев [и др.] // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2019. – Т. 10, № 1. – С. 68-72.
102. Li J., Zhang Z., Zhang M., Guo M., Wang X. The influence of SiO₂ on the extraction of Ti element from Ti-bearing blast furnace slag//Steel Research International. 2011. V. 82. № 6. Pp. 607–614.
103. Аспекты получения стали из природно-легированных ванадием титаномагнетитовых руд / А.С. Харченко, М.В. Потапова, В.И. Сысоев // Современные проблемы электрометаллургии стали : Материалы XVIII Международной конференции, Первоуральск, 24-27 сентября 2019 г. : в 2 ч. – Челябинск : Издательский центр ЮУрГУ. – Ч. 2. – С. 182-187

104. Однородность микроагрегатов псевдобрукит-гематитового состава, проявляющаяся при окислительном обжиге титаномагнетитовых руд Медведевского месторождения / Е. А. Горбатова, Б. И. Пирогов, М. С. Колкова [и др.] // Разведка и охрана недр – 2020. – № 6. – С. 47-52
105. Исследование физико-химических свойств агломерата повышенного качества фабрики № 5 ПАО «ММК» при восстановлении в среде водорода / С.К. Сибатуллин, А.С. Харченко, В.И. Сысоев, А.А. Полинов // Черные металлы. – 2022. – № 3. – С. 4-9. – DOI 10.17580/chm.2022.03.01
106. Харченко, А.С. Интерактивная система энергоресурсосбережения при выплавке чугуна в доменных печах, оснащенных лотковым загрузочным устройством: научно обоснованные технологические решения: дис. докт. техн. наук : 05.16.02 / Александр Сергеевич Харченко. – Магнитогорск, 2019. – 434 с.
107. Sibagatullin, S. K. Physicochemical characteristics of high-quality sinter, manganese ore and their mixture reduced with hydrogen / S. K. Sibagatullin, A. S. Kharchenko, V. I. Sysoev // AIP Conference Proceedings : 16, Nizhny Tagil, 17–19 июня 2021 года. – Nizhny Tagil, 2022. – P. 020055. – DOI 10.1063/5.0074571
108. Физико-химические характеристики железорудного сырья при восстановлении в среде водорода под статической нагрузкой / С. К. Сибатуллин, А. С. Харченко, В. И. Сысоев, У. Ж. Игликова // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования : Тезисы 80-й международной научно-технической конференции, Магнитогорск, 18–22 апреля 2022 года. Том 1. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2022. – С. 86
109. Павлов, А.В. Работа доменных печей ОАО «ММК» с высокой долей окатышей в шихте. Часть 1 / А.В. Павлов, О.П. Онорин, Н.А. Спиринов, А.А. Полинов // Metallurg. – 2016. – № 6. – С. 36-42.
110. Исаенко, Г.Е. Влияние основности на комплекс металлургических свойств агломерата / Г.Е. Исаенко, Д.А. Ковалев, Г.А. Нечкин, Д.А. Чернавин, В.А. Кобелев // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической

информации. – 2022. – № 78 (2). – С. 121-128. – <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2022-2-121-128>

111. Витькина, Г.Ю. Изучение металлургических свойств титаномагнетитового сырья / Г.Ю. Витькина, А.Н. Дмитриев, Р.В. Петухов, Ю.А. Чесноков // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2015. – № 12 (1392). – С. 26-30.

112. Сысоев, В. И. Влияние на горячую прочность и восстановимость агломерата его хранения в воздушной среде / В. И. Сысоев, С. К. Сибегатуллин, А. С. Харченко // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования : тезисы докладов 78-й международной научно-технической конференции, Магнитогорск, 20–24 апреля 2020 года. Том 1. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2020. – С. 118

113. Рощин, В.Е. Физическая интерпретация теории восстановления окисления металлов / В.Е. Рощин, А.В. Рощин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. – 2016. – Т. 16. № 4. – С. 29-39.

114. Ефименко, Г.Г. Теоретические основы и технология подготовки металлургического сырья к доменной плавке / Г.Г. Ефименко, О.А. Симонов, В.И. Губанов [и др.] // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 1981. – № 2. – С. 12-27.

115. Корнилова, Н.К. Восстановимость как характеристика качества железорудного материала и способы ее измерения / Н.К. Корнилова, Ф.М. Журавлев, А.М. Чернышов // Сталь. – 1986. – № 1. – С. 9-12.

116. González, F. Iron Ore Sintering: Quality Indices / F. González, D. Buztinza, R. Bustinza, [et al.] // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. – 2017 – – No. 10 (38). – DOI:10.1080/08827508.2017.1323744.

117. Журавлев, Ф.М. Окискованный, полностью офлюсованный железорудный материал для доменной плавки с лучшими металлургическими характеристиками агломерата и окатышей / Ф.М. Журавлев, В.П. Лялюк, Д.А. Кассим, И.А. Ляхова,

Е.В. Чупринов // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2015. – № 1. – С. 31-38.

118. Lu, L. Recent advances in iron ore sintering / L. Lu, O. Ishiyama // Mineral Processing and Extractive Metallurgy. – 2016. – No. 3 (125). – pp. 132-139. – DOI:10.1080/03719553.2016.1165500

119. Антипов, Н.С. Промышленное апробирование новой технологии спекания двухслойной шихты / Н.С. Антипов, С.А. Зевин, Г.В. Коршиков [и др.] // Сталь. – 1987. – № 5. – С. 8-15.

120. Fukuda, T. The Result of Higher Bed Test Operation in Hirohata no. 1 Sinter Plant / T. Fukuda, M. Himeda, H. Yoshida [et al.] // Tetsu-to-Hagane. – 1984. – No. 70. – p. 30.

121. Вегман, Е.Ф. Термообработка агломерата / Е.Ф. Вегман // Бюл. ЦИИН ЧМ. – 1964. – № 11. – С. 33-35.

122. Похвиснев, А.Н. Опыты по термической обработке агломерата из руд КМА / А.Н. Похвиснев, Е.Ф. Вегман, В.А. Башков [и др.] // Сталь. – 1967. – № 3. – С. 197-200.

123. Сидоров, Н.Е. Применение нагретого и обогащенного кислородом воздуха при спекании железных руд / Н.Е. Сидоров, В.К. Антонов, Н.М. Мищенко // Сталь. – 1960. – № 10. – С. 878-883.

124. Соколов, Г.А. Влияние применения нагретого воздуха на показатели температурно-теплового режима агломерационного процесса / Г.А. Соколов, И.И. Гультай // Известия вузов. Черная металлургия. – 1968. – № 10. – С. 23-25.

125. Takeda, K. Recent development of ironmaking technology in JFE steel / K. Takeda, M. Oogami // JFE-Giho. – 2008. – No. 22. – pp. 1-5.

126. Inazumi, T. Iron ore sinter (review of steps taken to overcome the challenges due to japans lack of iron ore resources). / T. Inazumi. – Tokyo: The Iron and Steel Institute of Japan, 2000. – 299 p.

127. Honorato, E.P. Granulomertic optimisation of raw materials for ISF continuous segregation system in Usiminas' sintering plants / E.P. Honorato, V. Seshadri // *Ironmaking and Steelmaking*. – 2008. – No. 6 (35). – pp. 405–415.
128. Oyama, N. Development of coating granulation process at commercial sintering plant for improving productivity and reducibility / N. Oyama, H. Sato, K. Takeda, [et al.] // *ISIJ International*. – 2005. – No. 6 (45). – pp. 817–826.
129. Oyama, N. Development of new coating granulation technology of limestone and coke breeze / N. Oyama, K. Takeda, N. Fujii // *JFE Technical Report*. – 2008. – No. 22. – pp. 32–37.
130. Патент RU 2146296 С1 Российская Федерация, МПК С22В 1/16 (2006.01). Высокоосновный агломерат / В.С. Лисин, В.Н. Скороходов, В.П. Настич [и др.]; № 99114698/02: заявл. 07.06.1997: опубл. 03.10.2000
131. Патент RU 2164252 С1 Российская Федерация, МПК С22В 1/16. Способ спекания низкоосновного агломерата / В.С. Лисин, В.Н. Скороходов, В.П. Настич [и др.]; № 99114732/02: заявл. 06.07.1999: опубл. 20.03.2001
132. Ковалев, Д.А. Разработка технологии агломерации с ферритными смесями / Д.А. Ковалев, С.В. Титов, Е.З. Пономарев // *Металлургия и коксохимия*. – 1983. – № 79. – С. 45-47
133. Ishiyama, O. Granulation technology of raw material for sinter ore in Tobata No. 3 sinter plant / O. Ishiyama, K. Higuchi, K. Shinagawa [et al.]. // In: *The Chinese Society for Metals*. (ed). 2011 (8th) CSM annual meeting. – Beijing, China: Metallurgical Industry Press, 2011.
134. Kamijo, C. Technology for productivity improvement of sintering based on designing of composite granulation and bed structure of sinter mixture / C. Kamijo, M. Hara, Y. Yamaguchi [et al.] // *ISIJ International*. – 2013. – No. 53 (9). – pp. 1497–1502.
135. Патент UA 95832, МПК В02С 4/10, В02С 4/12, В02С 13/08, В02С 13/09, С22В 1/20. Способ дробления агломерата в одновалковой зубчатой дробилке ударом / Э.П. Левченко, О.А. Левченко, Д.Ю. Костромицкий; заявл. 02.11.2009, № а200911020; опубл. 12.09.2011, Бюл. № 17. – 3 с.

136. Фролов, Ю. А. Анализ охлаждения агломерата на линейном охладителе / Ю. А. Фролов, Л. И. Полоцкий, Л. И. Каплун // Сталь. – 2017. – № 2. – С. 2-9. – EDN XXVXBD.
137. Сибгатуллин, С.К. Производство агломерата при снижении в шихте доли концентрата ССГПО и аглоруды Михайловского ГОКа в условиях ОАО "ММК" / С.К. Сибгатуллин, К.В. Сенькин, М.Ф. Гибадулин [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2005. – № 4 (12). – С. 9-10.
138. Исследование перспективной рудной базы для современных условий ПАО "ММК" / С. К. Сибгатуллин, В. И. Сысоев, Е. О. Харченко, Д. Н. Гущин // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования : Тезисы докладов 81-й международной научно-технической конференции, Магнитогорск, 17–21 апреля 2023 года. Том 1. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2023. – С. 96
139. Рационализация состава железорудной части аглошихты лабораторными исследованиями / В. И. Сысоев, Г. З. Магасумов, С. К. Сибгатуллин, Н. В. Филимонов // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования : Тезисы докладов 81-й международной научно-технической конференции, Магнитогорск, 17–21 апреля 2023 года. Том 1. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2023. – С. 98
140. Чукин, Д.М. Научно-техническое сопровождение освоения работы аглофабрики № 5 ПАО «ММК» / Д.М. Чукин, Д.Н. Гущин, В.Е. Котышев, Ю.А. Фролов // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2022. – № 12 (78). – С. 1038-1048. – <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2022-12-1038-1048>
141. Чукин, Д.М. Усреднение железорудного сырья на аглофабрике № 5 ПАО «ММК» / Д.М. Чукин, А.А. Андрюшечкин, Ю.А. Фролов, В.Е. Котышев, Н.И. Котышева // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической

информации. – 2022. – № 10 (78). – С. 834-844. – <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2022-10-834-844>

142. Гушин, Д.Н. Влияние на процесс агломерации распределения извести между усреднительным складом и шихтовым отделением аглофабрики № 5 ПАО «ММК» / Д.Н. Гушин, Д.М. Чукин, Ю.А. Фролов, А.А. Андрюшечкин, В.Е. Котышев // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2023. – № 2 (79). – С. 95-106. – <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2023-2-95-106>

143. Чукин, Д.М. Исследование газодинамической работы агломерационных машин аглофабрики № 5 ПАО «ММК» / Д.М. Чукин, Ю.А. Фролов, В.Е. Котышев // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2022. – № 8 (78). – С. 682-691. – <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2022-8-682-691>

144. Паньчев, А.А. Параметры агломерации михайловских и лебединских концентратов / А.А. Паньчев, А.П. Никонова // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2009. – № 4 (28). – С. 18-22.

145. Одинцов, А.А. Опыт использования профилактированного известью железорудного концентрата в агломерации / А. А. Одинцов, В. А. Долинский // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2013. – № 3 (5). – С. 16-23.

146. Ганин, Д.Р. Обзор и анализ математических моделей расчёта производительности агломерационной машины / Д.Р. Ганин, В.Г. Дружков, А.А. Паньчев, А.Н. Шаповалов // Теория и технология металлургического производства. – 2014. – № 2 (15). – С. 20-26.

147. Kamijo, C. Technology for productivity improvement of sintering based on designing of composite granulation and bed structure of sinter mixture / C. Kamijo, M. Hara, Y. Yamaguchi [et al.] // ISIJ International. – 2013. – No. 53 (9). – pp. 1497–1502.

148. Влияние распределения воды между операциями смешивания и окомкования на прочностные свойства аглошихты и показатели качества железорудного агломерата / С. К. Сибгатуллин, А. С. Харченко, В. И. Сысоев [и др.] // Теория и технология металлургического производства. – 2023. – № 1(44). – С. 4-10
149. Влияние скорости вращения барабана-окомкователя на газодинамические свойства и прочность гранул окомкованной агломерационной шихты / Д. М. Чукин, В. И. Сысоев, К. В. Кургузов [и др.] // Технологии металлургии, машиностроения и материалобработки. – 2021. – № 20. – С. 4-13
150. Влияние фракционного состава извести на газодинамические свойства и прочность гранул окомкованной агломерационной шихты / Д. М. Чукин, В. И. Сысоев, Д. В. Юдин [и др.] // Технологии металлургии, машиностроения и материалобработки. – 2021. – № 20. – С. 13-21
151. Влияние низкощелочных красных шламов на состав и структуру агломерационной шихты из железорудных концентратов различного генезиса / Ширяева Е.В., Подгородецкий Г.С., Малышева Т.Я., Деткова Т.В., Горбунов В.Б. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2015. – № 9 (57). – С. 13
152. Ганин, Д.Р. Использование добавок бурожелезняковых руд Новокиевского месторождения в производстве агломерата / Д.Р. Ганин, В.Г. Дружков, А.А. Паньчев [и др.] // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2016. – № 10 (1402). – С. 27-35.
153. Дудоров, М.В. Термодинамика роста металлической фазы при твердофазном восстановлении металлов в комплексных оксидах / Дудоров М.В., Дрозин А.Д., Роцин В.Е. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Химия. – 2021. – Т. 13. № 3. – С. 49-59.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

ММК СМК НТЦ (45)-9-2 (А), (Г)

УТВЕРЖДАЮ
Начальник НТЦ ПАО «ММК»
А.Д. Картунов
М.П.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов работ по договору № 254745 от 20.03.2023
с ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»

по теме: Поиск рациональной рудной базы для современных условий
работы агломерационной фабрики № 5 ПАО «ММК»

Работа проводилась в соответствии с главой IX «Создание систем улучшения состояния окружающей среды и повышения энергосбережения и эффективности использования природных ресурсов», пунктом 4 «Промышленность», статьей 1 «Разработка энерго- и ресурсосберегающих технологий в промышленности, позволяющих снизить негативное воздействие на окружающую среду» «Перечня научных исследований и опытно-конструкторских разработок, расходы налогоплательщика на которые в соответствии с п. 7 ст. 262 части второй НК РФ включаются в состав прочих расходов в размере фактических затрат с коэффициентом 1,5», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.12.2008 №988.

Краткое описание выполненной работы

1 Разработано рациональное соотношение железорудных концентратов для существующей сырьевой базы ПАО «ММК»:

- сформированы агломерационные шихты, включающие концентраты Лебединского, Михайловского, Соколовско-Сарбайского и Ковдорского ГОКов и Михайловского флотоконцентрата отдельно и в смеси по различным вариантам;
- выявлена рациональная влажность агломерационных шихт по вариантам концентратов;
- проведено спекание агломерата из подготовленных концентратов в виде шихт с выявлением рациональных вариантов по различным признакам.
- проведено определение химического состава произведенного агломерата методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии.
- проведено исследование влияния основности шихты при использовании в составе шихты флотоконцентрата Михайловского ГОК.

2 Выполнен подбор оптимального вида руды и его количества для спекания с концентратами Михайловского ГОК стандартного и флотационного путем проведения лабораторных исследований:

- проведено сопоставление исследуемых агломерационных руд: Михайловского, Стойленского, Богословского, Сосновского, Туканского месторождений;
- сформированы агломерационные шихты, включающие аглоруды по различным вариантам;
- выявлена рациональная влажность шихт, включающих аглоруды по вариантам;
- проведено спекание агломерата с использованием подготовленных аглоруд и подготовленного концентрата в виде шихт и выявление рациональных вариантов по различным признакам;
- определен химический состав произведенного агломерата методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии.

3 Разработан проект Изменения к ТИ-101-ГОП-7 по изменению состава агломерационной шихты.

4 Предоставлены исходные технологические данные для проведения расчета экономической эффективности разработанных решений отделом производственной экономики ПАО «ММК».

Полученный результат

Введено в действие (22.06.2023 г.) Изменение №1 к ТИ 101-ГОП-7-2023 «Технологическая инструкция. Спекание офлюсованного агломерата на аглофабрике №5 ГОП», регламентирующее массовую долю компонентов шихты на аглофабрике №5.

После внедрения результатов НИОКР снижение производительности агломашин и содержания мелочи относительно достигнутых за 2021-2022 гг. и плановых за 2023 г. показателей не отмечается.

При этом химический состав агломерата на аглофабрике №5 после внедрения результатов НИОКР (июль 2023 г.) относительно периода использования в составе шихты сырья АО «ССГПО» (июль 2021 г.) изменился следующим образом:

- содержание железа (Fe) увеличилось на 0,9 % (с 54,4 % до 55,3 %);
- содержание серы (S) уменьшилось на 0,028 % (с 0,069 % до 0,041 %);
- содержание закиси железа (FeO) уменьшилось на 1,77 % (с 10,1 % до 8,33 %);
- содержание окиси магния (MgO) увеличилось на 0,04 % (с 1,99 % до 2,03 %).

Способность к правовой охране полученного результата

Не выявлена.

Дата фактического внедрения: «22» июня 2023 г.

Срок полезного использования: до поступления в ПАО «ММК» сырья АО «ССГПО».

Работа проводилась с целью обеспечения технологической стабильности производства агломерата на аглофабрике № 5 в условиях изменившейся рудной базы.

Научный руководитель



А.С. Харченко