

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

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Магнитогорск – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Научный руководитель

Харченко Александр Сергеевич,
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Дмитриев Андрей Николаевич, доктор
технических наук, профессор, ФГБУН
«Институт металлургии Уральского
отделения Российской академии наук»,
главный научный сотрудник лаборатории
пирометаллургии черных металлов

Ганин Дмитрий Рудольфович,
кандидат технических наук,
Новотроицкий филиал ФГАОУ ВО
«Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС»,
доцент кафедры металлургических
технологий и оборудования

Ведущая организация:

ФГАОУ ВО «Южно-Уральский
государственный университет»
(национальный исследовательский
университет), г. Челябинск

Защита состоится 21 мая 2024 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 24.2.324.01, на базе ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, малый актовЫй зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» и на сайте <https://www.mgtu.ru/>.

Автореферат разослан «__» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Мезин Игорь Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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.

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. 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, восстанавливаемость, 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. 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 Металлургии 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 ССПО) 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 сталеплавыльщиков 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.

Основное содержание работы

Во введении обозначена актуальность тематики исследований, сформулированы цель работы, задачи, научная новизна и практическая значимость.

В первой главе проведен обзор научной и технической литературы по вопросам современных требований к металлургическим характеристикам агломерата для доменной плавки, механизмов формирования качества агломерата и влияющих на него факторов, технологических приемов для повышения качества агломерата, включая обзор применяемых и перспективных окомковывающих добавок, способов повышения технико-экономических показателей агломерационного процесса, влияния качества агломерата на технико-экономические показатели доменного процесса.

Проведенный анализ проблемы построения новой рудной базы, основанной на рациональных принципах, показал необходимость комплексного решения, включающего целый ряд аспектов воздействия на качество агломерата и технико-экономические показатели агломерационного процесса. Выявлено, что необходимо решить проблемы составления рациональных железорудных смесей из имеющихся разновидностей доступного отечественного сырья, подобрать окомковывающие добавки и режим их введения, в том числе с учетом высокотемпературных

характеристик получаемого агломерата. Исходя из результатов проведенного анализа, сформулированы основные цели и задачи настоящего исследования.

Во второй главе описана методика лабораторных экспериментов по получению агломерата и исследованию его физико-механических и физико-химических свойств. Для проведения экспериментов по производству агломерата сформированы агломерационные шихты из моноконцентратов Лебединского, Михайловского (стандартный и флотационный), Соколовско-Сарбайского, Ковдорского ГОКов, моноаглоруд месторождений: Михайловское, Стойленское, Богословское, Сосновское, Туканское и Бапы и их смесей в различных вариантах.

На первом этапе выявлены моноконцентраты и моноаглоруды, обеспечивающие наиболее высокие показатели агломерационного процесса и качества агломерата, после чего из них были составлены двойные и тройные смеси, по результатам спекания которых построены треугольные диаграммы типа состав-свойство. В качестве выходных параметров использованы выход годного агломерата по фракции +5 мм, удельная производительность физической модели по годному агломерату и прочностные свойства в холодном состоянии: сопротивление годного агломерата удару (+5 мм); разрушение годного агломерата (0,5-5 мм); истирание годного агломерата (0-0,5 мм). Выявлены рациональные составы, которые были исследованы и внедрены в производство ПАО «ММК».

Доля железорудной смеси (ЖРС) в железосодержащей части аглошихты составляла 70-75 %, включая известь в количестве 3,5 % от ЖРС, оставшиеся 25-30 % приходились на возврат. Химический состав некоторых компонентов железорудной части шихты приведен в табл. 1.

Для изучения влияния связующих добавок на параметры окомкования агломерационной шихты исследованы следующие материалы:

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

Добавки вводили в агломерационную шихту взамен части извести. Смешивание, увлажнение и последующее окомкование компонентов шихты проводилось в одном агрегате, смесителе-окомкователе, который представляет собой пустотелый цилиндрический барабан диаметром по рабочей поверхности 320 мм и длиной 125 мм, оснащенный шестью полочками и с регулируемым наклоном. Скорость вращения барабана составляла 32 об/мин.

Спекания проведены в лабораторной аглошаше, выполненной из стальной трубы диаметром в свету 70 мм и высотой 300 мм. Зажигание шихты производили при помощи пламени пропан-бутановой газовой горелки, в течение ровно 2 мин. Для облегчения поджига на слой сырой окомкованной шихты сверху насыпали коксовую мелочь класса 2-3 мм массой 30 г.

Полученный аглоспек взвешивали и дробили на щековой дробилке сзором между щеками 17,5 мм. Раздробленный агломерат рассеивали на сите с круглыми отверстиями диаметром 5 мм для определения относительного выхода годного агломерата по процентному содержанию класса +5 мм.

Таблица 1 – Неполный химический состав некоторых компонентов ЖРС

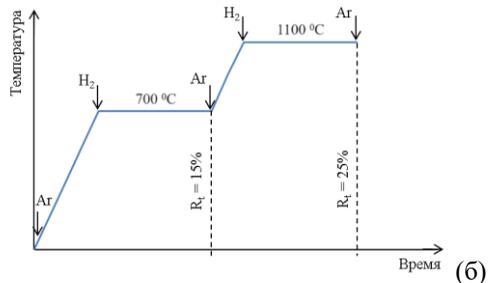
Вид материала	Содержание, %						
	Fe	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	S	P
Концентраты:							
Михайловский	65,2	0,23	8,43	0,28	0,01	0,012	0,009
Михайловский флотационный	67,8	0,28	4,95	0,14	0,10	0,010	0,006
Лебединский	69,3	0,11	3,18	0,32	0,10	0,154	0,007
ССГПО	65,7	0,96	4,22	1,15	1,44	0,350	0,016
Аглоруды месторождений:							
Михайловское	51,9	1,78	16,90	0,55	1,49	0,297	0,031
Богословское	50,8	8,50	9,95	1,47	2,85	2,680	0,024
Стойленское	53,0	1,50	10,80	0,73	2,85	0,412	0,067
Туканское	50,6	0,10	10,40	0,07	2,50	0,412	0,140
Бапы	52,3	0,50	13,80	26,30	0,46	0,140	0,060

Годный агломерат класса +5 мм испытывали по методике, аналогичной пробе «холодной прочности» по ГОСТ 15137-77; испытанию подвергали 1 кг агломерата.

Определено изменение физико-механических и физико-химических свойств при восстановлении водородом под статической нагрузкой 50 кПа и температурах 700 и 1100 °С до степеней восстановления 15 % и 25 % соответственно, с использованием специализированного автоматизированного комплекса (R.V. AUTOMAZIONE s.r.l., Италия, рис. 1 (а)) лаборатории испытаний физико-химических свойств железорудного сырья каф. МиХТ МГТУ им. Г.И. Носова.



(а)



(б)

Рисунок 1 – Автоматизированный комплекс LECO для испытаний металлургических свойств железорудных материалов при высокотемпературном восстановлении под статической нагрузкой (а); программа подачи газов при испытаниях агломерата (б)

Фиксировались следующие величины: усадка слоя агломерата, изменение массы (непрерывно), перепад давления при прохождении газового потока в слое материала (на выборочных этапах). По изменению массы рассчитана абсолютная степень восстановления R_t (рис. 1 (б)).

В третьей главе представлены результаты физического моделирования агломерационного процесса и испытаний свойств лабораторных агломератов, а также выполнены математическая обработка и обобщение полученных данных.

Наиболее высокие технико-экономические показатели процесса агломерации из исследуемых моноконцентратов и моноаглоруд обеспечены следующими составами шихт:

- моноконцентрат Лебединский в составе шихты на базе аглоруд Михайловской и Богословской: выход годного агломерата по классу +5 мм ($ВГ_{+5}$) – на уровне 85,5 %, удельная производительность установки по годному агломерату ($УП_{+5}$) – 1,490 т/(м²·ч), сопротивление годного агломерата удару по классу +5 мм ($СУ_{+5}$) – 77,9 %.

- моноаглолюда Стойленского ГОК в составе шихты на базе Михайловского флотационного концентрата: $ВГ_{+5} = 86,0 \%$; $УП_{+5} = 1,466$ т/(м²·ч), $СУ_{+5} = 79,0 \%$.

Разработаны рациональные смеси концентратов:

- максимальная производительность и прочность агломерата обеспечена шихтой на основе 100 % Лебединского концентрата;

- для условий аглофабрик ПАО «ММК» смесь, состоящая из Михайловского и Лебединского концентратов, взятых в соотношении 70 / 30, обеспечила эквивалентную замену по удельной производительности аглоустановки ($УП_{+5} = 1,367$ т/(м²·ч)) моноконцентрату ССПО ($УП_{+5} = 1,366$ т/(м²·ч)) при одновременном росте сопротивления годного агломерата удару по содержанию класса +5 мм после испытаний в барабане, на 4,6 % (отн.), и снижении выхода годного агломерата на 2,5 % (отн.).

- замена Михайловского стандартного концентрата на не используемый в промышленности Михайловский флотационный в среднем обеспечило повышение удельной производительности агломерационной установки на 4,7 %; выхода годного агломерата из его спёка – на 0,6 % (отн.) при снижении выхода фракции +5 мм после испытания по ГОСТ 15137-77 на 3,0 % (отн.) В условиях применения флотоконцентрата в составе шихты максимальная производительность, составившая 1,505 т/(м²·ч), при приемлемых значениях по выходу годного агломерата $ВГ_{+5} = 85,5 \%$ и сопротивления годного агломерата удару $СУ_{+5} = 75,7 \%$ обеспечена за счет формирования смеси его с Лебединским концентратом в равных долях.

Зависимости показателей процесса агломерации и качества готового агломерата, полученного спеканием шихт из смесей Михайловского стандартного и флотационного концентратов на основе двойных и тройных смесей аглоруд, представлены соответственно в виде уравнений (1)-(3) с величиной R^2 соответственно 0,78; 0,74 и 0,82 и треугольных диаграмм на рис. 2.

$$ВГ_{+5} = 83,92M + 84,13B + 85,04C + 3,98MB + 5,58MC + 4,81BC - 2,58MBC, \quad (1)$$

$$УП_{+5} = 1,29M + 1,32B + 1,36C - 0,0082MB + 0,031MC - 0,16BC + 0,74MBC, \quad (2)$$

$$CU_{+5} = 73,77M + 76,02B + 76,85C - 0,086MB + 5,06MC + 2,17BC + 24,64MBC, \quad (3)$$

где $ВГ_{+5}$ – выход годного агломерата по классу крупности +5 мм, %;

$УП_{+5}$ – удельная производительность агломерационной установки по годному агломерату, $t/(m^2 \cdot ч)$;

CU_{+5} – сопротивление годного агломерата удару, по выходу класса крупности +5 мм, %, после испытания по ГОСТ 15137-77;

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

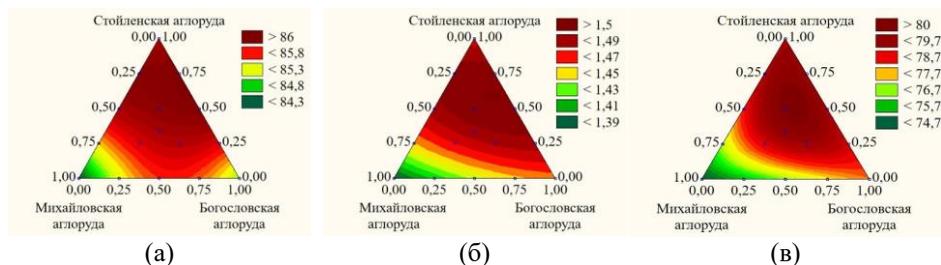


Рисунок 2 – Выход годного агломерата класса +5 мм, %, (а), удельная производительность агломерационной установки по годному агломерату, $t/(m^2 \cdot ч)$, (б), сопротивление годного агломерата удару, по содержанию фракции +5 мм после испытания в трубе, %, (в), для шихт на основе 100% Михайловского флотационного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

Наиболее высокая производительность обеспечена рациональной смесью, включающей 50 % Стойленской и по 25 % Богословской и Михайловской агломерационных руд. Спекание ее в смеси со стандартным Михайловским концентратом обеспечило получение следующих показателей: $УП_{+5} = 1,406 t/(m^2 \cdot ч)$; $ВГ_{+5} = 86,4 \%$; $CU_{+5} = 78,4 \%$. По сравнению с усредненными показателями качества агломерата, произведенного из моноруд Михайловского, Богословского и Стойленского ГОКов в смеси со стандартным Михайловским концентратом, применение рациональной смеси аглоруд обеспечило повышение удельной производительности лабораторной аглоустановки на 6,2 %, выхода годного агломерата – на 2,5 % (отн.) и сопротивления годного агломерата удару – на 3,9 % (отн.)

Спекание шихт на основе рациональной смеси аглоруд с заменой стандартного Михайловского концентрата на флотационный обеспечило повышение удельной производительности на 10,2 %, выхода годного агломерата на 0,7 % (отн.) и сопротивление годного агломерата удару на 3,2 % (отн.)

Спекание шихт на основе рациональной смеси аглоруд, включающей Стойленскую, Богословскую и Михайловскую руды в соотношении 50/25/25, с заменой стандартного Михайловского концентрата на рациональную смесь, включающую 70 % Михайловского стандартного и 30 % Лебединского

концентратов, обеспечило следующее повышение показателей процесса и качества агломерата:

- удельная производительность 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 увеличилось с 75,5% до 80,2% (на 6,2 % (отн.)).

Исследована возможность введения Туканской руды с различным содержанием железа (от 34,0 % до 50,6 %) в состав агломерационной шихты аглофабрики №5 ПАО «ММК». 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, следующие изменения показателей:

- удельная производительность лабораторной установки по годному агломерату класса +5 мм увеличилась в среднем на 7,5 %;

- выход годного агломерата по классу +5 мм уменьшился в среднем на 3,7 % (отн.);

- сопротивление годного агломерата удару по выходу класса +5 мм после испытания по ГОСТ 15137-77 снизилось в среднем на 1,3 % (отн.)

Выявлено новое связующее, полученное из отходов СУУ агломерационного производства, которое обеспечило высокоэффективное повышение комкуемости шихтовых материалов. Разработан режим термоподготовки отходов СУУ с целью усиления комкующих свойств материала, заключающийся в прокаливании его при температуре 160 °С. Основным соединением СУУ является двухводный кристаллогидрат сульфата кальция (гипса $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), характеризующийся относительно слабыми комкующими свойствами. Согласно проведенному термографическому исследованию (рис. 3), максимум интенсивности разложения водных форм сульфата кальция в составе отходов СУУ приходится на температуру 160 °С (кривая ДТГ на рис. 3), и в результате дегидратации формируется полуводный кристаллогидрат (алебастр $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$, устойчив до 180 °С). Дальнейшее нагревание сопровождается глубоким удалением из материала водных кристаллических фаз с образованием безводного сульфата («мертвого гипса», или ангидрита CaSO_4), который почти не способен гидратироваться и потому менее эффективен в качестве комкующей добавки.

Введение окомковывающей добавки на основе отходов СУУ, прокаленных при 160 °С, в агломерационную шихту в количестве 0,25 % от ЖРС взамен равной по массе части извести обеспечило улучшение показателей окомкования гранул, процесса 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.)

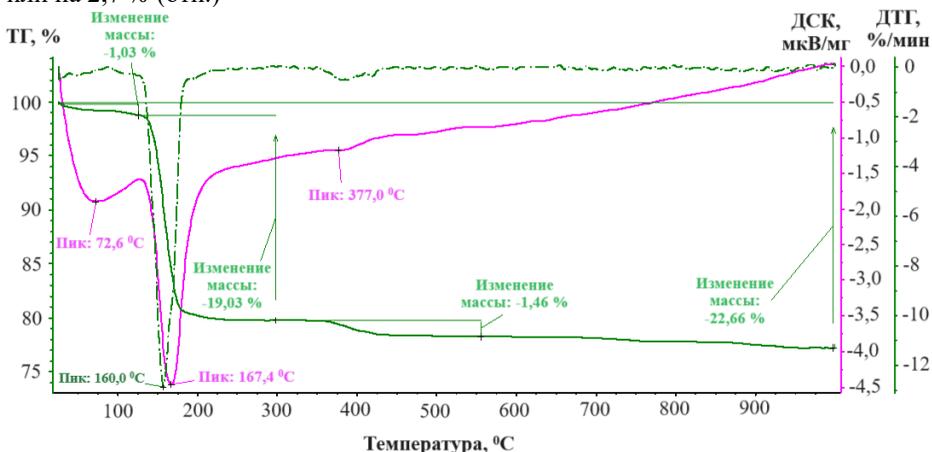
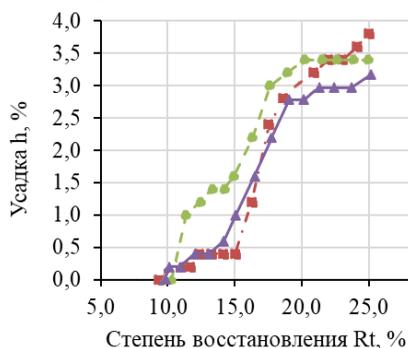


Рисунок 3 – Термограмма исходных отходов СУУ: зеленая сплошная линия – термогравиметрическая (ТГ) кривая; зеленая штрихпунктирная линия – дифференциальная термогравиметрическая кривая (ДТГ); фиолетовая линия – кривая дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК)

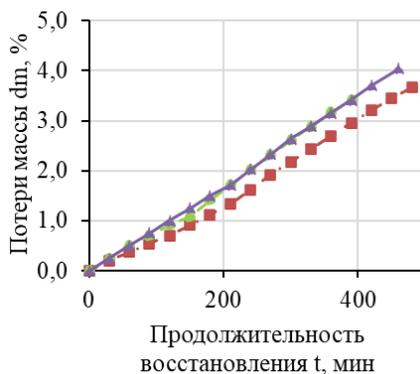
Применительно к шихтовым условиям агломерационных фабрик ПАО «ММК» введение в качестве окомковывающих добавок интерполимерного связующего или бентонита с рациональным расходом соответственно 0,5 % и 0,1 % от массы ЖРС взамен равной по массе части извести снизило коэффициент сопротивления сырой окомкованой шихты движению воздуха в среднем на 13,2 %. Улучшение параметров окомкования обеспечило следующее повышение показателей агломерации: выхода годного агломерата по классу +5 мм – на 1,9 % (отн.), удельной производительности агломерационной установки по годному агломерату – на 1,2 %, сопротивления годного агломерата удару в холодном состоянии по содержанию класса +5 мм после испытания по ГОСТ 15137-77 – на 2,0 % (отн.)

Опытные агломераты, полученные из шихт с использованием новых добавочных материалов, испытаны на прочность и восстановимость при

нагревании под статической нагрузкой в среде водорода. Согласно результатам, агломерат, полученный с использованием в шихте 0,25 % отходов СУУ, прокаленных при 160 °С, взамен части извести, демонстрировал после восстановления при температуре 1100 °С до степени восстановления 25,0 % усадку на 14,3 % (отн.) ниже, в сравнении с усадкой агломерата, полученного из базовой шихты с использованием извести (рис. 4 (а)). В результате увеличения горячей прочности было отмечено повышение газопроницаемости слоя восстановленного агломерата на 11,2 %, по снижению перепада давления в слое. 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 (рис. 4 (б)).



(а)



(б)

Рисунок 4 – Изменение усадки образца h, %, в зависимости от абсолютной степени восстановления агломерата Rt, %, (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, 0,25 % (—▲—)

В четвертой главе представлены результаты исследования работы двух агломерационных машин площадью спекания по 300 м² фабрики № 5 ПАО «ММК» на разработанном рациональном сырье. В базовом периоде 1 представлены показатели работы в среднем для агломашин 1 и 2 на традиционном для условий ПАО «ММК» сырье – концентрате ССГПО. Его доля от массы концентратов составляла 97 %. Смесь агломерационных руд была представлена Михайловской, Стойленской, Богословской и Сосновской рудами со средними долями от массы смеси аглоруд соответственно 45,6; 7,63; 12,0; 34,8 % соответственно при общей доле смеси 19,0 % от массы ЖРС (табл. 2).

Таблица 2 - Компонентный состав железорудной части шихты
в исследуемые периоды

Компоненты	База I (1303 л-ч)	База II (1282 л-ч)	Опытный (1111 л-ч)
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	11,1/65,8	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
Металлодобавки, % от массы ЖРС	8,8	11,3	6,8

Базовый период 2 характеризует работу агломерационных машин в условиях незапланированного прекращения поставок концентратов ССГПО в ПАО «ММК». Основой смеси железорудных концентратов являлся концентрат Михайловского ГОК.

Его содержание составляло 46,3 % от массы смеси. Индивидуальные доли остальных четырех концентратов, ССГПО, Лебединского, Ковдорского и Стойленского, не превышали 24,3 % от массы смеси концентратов. Общая доля смеси концентратов в базовом периоде 2 по сравнению с базовым периодом 1 снизилась от 72,2 до 68,7 % от массы ЖРС в условиях роста доли смеси аглоруд от 19 до 20 % от массы ЖРС. Смесь включала Стойленскую, Михайловскую и Богословскую руды с содержаниями соответственно 48,5; 33,8 и 17,7 % от массы смеси аглоруд.

В периоде 3 (опытный) испытана рациональная шихта, состав которой был установлен в результате физического моделирования процесса получения агломерата из различных шихт в лабораторных условиях. Рациональная шихта опытного периода включала концентраты Михайловского и Лебединского ГОКов с содержанием их в шихте соответственно 64,1 и 32,9 %, агломерационные руды Михайловского ГОК и месторождения Бапы со

средними долями 55,9 % и 44,1 % от массы смеси аглоруд при общей их доле 20,6 % от массы ЖРС.

Показатели агломерационного процесса и качества агломерата в исследуемые периоды приведены в табл. 3.

Таблица 3 – Среднемесячные показатели работы машин фабрики №5
в изучаемые периоды

Показатели	База I (1303 л-ч)	База II (1282 л-ч)	Опытный (1111 л-ч)
Календарное время, ленто-часы	744	720	744
Простой, ч	93	80	120
Чистое (горячее) время, ленто-часы	652	641	625
Высота слоя, мм	630	610	623
Расход кокса, %	3,9	3,4	3,6
Скорость ленты машины, м/мин	2,250	2,185	2,120
Произведено, т:			
- годного агломерата (+5 мм)	220528	209354	211901
- возврата (0-5 мм)	111808	106470	95942,5
- постели (10-20 мм)	26108	26849	26613
Расход шихты, т	358443	344497,5	334355
Выход годного (+5 мм), %	61,6	60,8	63,4
Выход возврата (0-5 мм), %	31,2	30,9	28,7
Выход постели (10-20 мм), %	7,3	7,8	8,0
Производительность агломашин, тонн в горячий ленто-час	338,7	326,8	339,6
Температура горна, °С	1124	1094	1131
Разрежение, кПа:			
коллектор №1	16,1	15,3	12,3
коллектор №2	15,9	15,5	12,5

В базовом периоде 2 по сравнению с базовым периодом 1 изменение состава шихты сопровождалось уменьшением производительности агломерационных машин в среднем на 3,53 % и уменьшением выхода годного агломерата на 1,22 %. Использование рациональной шихты в опытном периоде обеспечило повышение производительности агломерационных машин в среднем на 0,27 % по сравнению с базовым периодом 1 и на 3,92 % по сравнению с базовым периодом 2. Выход годного агломерата в опытном периоде вырос на 3,01% (отн.), по сравнению с базовым периодом 1 и на 4,28 % (отн.) относительно базового периода 2.

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 аглочашки 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 ССПО. 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 ССПО ($\text{УП}_{+5} = 1,366 \text{ т}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$) 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.

Основное содержание работы отражено в следующих публикациях:

В рекомендованных ВАК РФ изданиях:

1. Влияние распределения воды между операциями смешивания и окомкования на прочностные свойства аглошихты и показатели качества железорудного агломерата / С. К. Сибатуллин, А. С. Харченко, В. И. Сысов [и др.] // Теория и технология металлургического производства. – 2023. – № 1(44). – С. 4-10

2. Определение рациональных параметров агломерации титаномagnetитовых руд Сураямского месторождения / А. С. Харченко, С. К. Сибатуллин, В. И. Сысов, С. В. Осколков // Черные металлы. – 2022. – № 12. – С. 10-16. – DOI 10.17580/chm.2022.12.02

3. Исследование физико-химических свойств агломерата повышенного качества фабрики № 5 ПАО «ММК» при восстановлении в среде водорода / С. К. Сибатуллин, А. С. Харченко, В. И. Сысов, А. А. Полинов // Черные металлы. – 2022. – № 3. – С. 4-9. – DOI 10.17580/chm.2022.03.01

В изданиях, входящих в наукометрические базы Web of Science и Scopus:

1. 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

2. Aspects of Sintering the Magnesite 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. – 56 (5). – pp. 1089-1101

3. Physico-mechanical properties of the sinter of various chemical composition / S. K. Sibagatullin, A. S. Kharchenko, V. I. Sysoev, D. N. Gushin // IOP Conference Series:

Materials Science and Engineering : 15, Nizhny Tagil, 18–19 июня 2020 года. – Nizhny Tagil, 2020. – P. 012033. – DOI 10.1088/1757-899X/966/1/012033

В других изданиях:

1. Исследование перспективной рудной базы для современных условий ПАО "ММК" / С. К. Сибатуллин, В. И. Сысоев, Е. О. Харченко, Д. Н. Гуцин // 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

2. Рационализация состава железорудной части аглошихты лабораторными исследованиями / В. И. Сысоев, Г. З. Магасумов, С. К. Сибатуллин, 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

3. Влияние расхода железорудного концентрата магнезиального на показатели агломерационного процесса при спекании его в смеси с магнетитовым концентратом / Д. Н. Гуцин, 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

4. 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

5. 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

6. 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

7. 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

8. Влияние на горячую прочность и восстановимость агломерата его хранения в воздушной среде / В. И. Сысоев, С. К. Сибатуллин, 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

9. Разработка технологии спекания агломерата из концентратов Суроямского месторождения / Д. Н. Гущин, 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

10. К выбору влажности агломерационной шихты и содержания в ней углерода при спекании титаномагнетитовых концентратов / Д. Н. Гущин, С. К. Сибатуллин, А. С. Харченко, В. И. Сысоев, Ю. С. Малиханов // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2019. – Т. 10, № 1. – С. 68-72.