

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

*На правах рукописи*

**Бахтеев Эркин Маратович**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ И РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ДЛЯ  
ПРОИЗВОДСТВА ТИТАНОВЫХ ОКАТЫШЕЙ**

Специальность 2.6.2 – Metallургия черных, цветных и редких металлов

**Диссертация**

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

д.т.н., профессор **А.Л. Рутковский**

Владикавказ-2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. СОСТОЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ОКАТЫШЕЙ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	11
1.1 Титан: обзор ресурсов и методов производства .....	11
1.2 Развитие технологии производства окатышей .....	19
1.3 Технология получения окатышей из титансодержащего концентрата .....	23
1.3.1 Подготовка шихты и основные закономерности процесса окомкования	24
1.3.2 Факторы, влияющие на процесс окомкования .....	27
1.3.3 Термообработка окатышей на обжиговых конвейерных машинах .....	30
1.4 Современные технологии получения окатышей .....	32
1.5 Современные методы математического моделирования и оптимизации в производстве окатышей.....	38
1.5.1 Анализ известных математических моделей процесса формирования окатышей.....	38
1.5.2 Анализ известных математических моделей процесса спекания окатышей .....	41
1.6 Выводы по первой главе.....	42
2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ТИТАНОВЫХ ОКАТЫШЕЙ.....	44
2.1 Материалы и методы исследования.....	45
2.2 Постановка задачи .....	48
2.3 Моделирование процесса формирования окатышей в барабанном окомкователе .....	51

2.4 Обсуждение результатов .....	53
2.5 Выводы по второй главе.....	54
3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ ТИТАНОВЫХ ОКАТЫШЕЙ.....	55
3.1 Описание математической модели процесса сушки титановых окатышей...	55
3.2 Основные уравнения теплообмена в слое и сушки окатышей.....	58
3.3 Описание процесса проведения исследований и получения результатов .....	60
3.4 Постановка задачи моделирования .....	62
3.5 Моделирование процесса сушки титановых окатышей.....	64
3.5.1 Уравнения, описывающие зону окатыша.....	65
3.5.2 Обсуждение результатов .....	68
3.6 Моделирование процесса карботермического восстановления оксида металла с помощью итерационного алгоритма в системе Mathcad.....	69
3.6.1 Итерационный расчет методом дихотомии .....	74
3.7 Некоторые особенности моделирования процесса теплообмена при рекуперации нагретого воздуха.....	76
3.7.1 Постановка задачи .....	77
3.7.2 Описание установки .....	77
3.7.3 Математическое описание .....	79
3.8 Выводы по третьей главе .....	82
4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ШИХТЫ И УСТРОЙСТВО ДЛЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ТИТАНОВЫХ ОКАТЫШЕЙ.....	83
4.1 Влияние показателей влажности и газопроницаемости .....	83
4.2 Математическое моделирование процесса.....	86
4.3 Устройство для производства титановых окатышей .....	96

4.4 Выводы по четвертой главе .....	101
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	103
СПИСОК ИСТОЧНИКОВ.....	105

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** Металлический титан, его сплавы и соединения обладают уникальными свойствами и потому широко применяются в различных областях науки и техники. Для получения титана и различных его соединений используются титановые руды различного состава. Ильменитовые и рутиловые концентраты являются основным видом титанового сырья, составляя 90...95 % от перерабатываемых титансодержащих концентратов. В настоящее время развивается технология получения титана из титаномагнетитового сырья. Производство титана включает обогащение титановых руд, выплавку из них титанового шлака с последующим получением из него четыреххлористого титана и восстановление из последнего металлического титана магнием. Технология производства титана в настоящее время достигла высокого технического уровня, поэтому дальнейшее совершенствование производства возможно на основе методов моделирования и оптимизации. Получение окатышей является первоначальной стадией в технологической схеме производства титана и качественные показатели окатышей оказывают влияние на выход титана из исходного сырья.

Сложность оборудования и технологий в производстве титана в значительной степени затрудняют решение этих задач, а высокая энергоемкость делает их решение эффективными. Одним из таких технологических агрегатов является обжиговая конвейерная машина, используемая для производства окатышей в металлургической промышленности. Опыт эксплуатации действующих обжиговых машин показывает, что именно эффективность работы зон термообработки является определяющим фактором в обеспечении требуемых характеристик окатышей. Задача увеличения производительности эксплуатируемых в России обжиговых машин, в частности, интенсификации режима термообработки окатышей в последние десятилетия становится

актуальной. Для её решения целесообразно привлечь методов математического моделирования для оптимизации технологического процесса.

Дальнейшее совершенствование и исследование существующей технологии в производстве титановых окатышей в направлении оптимизации технологического режима с использованием методов математического моделирования является современной и востребованной актуальной проблемой улучшения технико-экономических показателей работы обжиговых машин.

**Степень научной разработанности темы.** Значительный вклад в развитии процессов получения железорудных окатышей на основе титаномагнетитовых концентратов внесли результатами своих исследований В.И. Коротич, В.А. Резниченко, В.П. Пузанов, Ю.А. Берман, Ю.А. Фролов, Н.А. Спирин, В.А. Кривонос, Г.Н. Бездежский, А.М. Парфенов, Е.Ф. Вегман, С.В. Базилевич, А.А. Сигов, Ф.М. Журавлев, В.А. Шурхал, Б.В. Линчевский, А.Л. Соболевский, В.М. Павловец, Р.М. Вайнштейн, А.Н. Дмитриев и зарубежные ученые S. Majercak, K. Meyer, T. T. Tsukerman, D. Zhu, S. Moraes, T. Ribeiro, N. Deepak, K.M. Komiyama и др.

Теоретической и методической основой данной работы послужили фундаментальные исследования S. Majercak, В.И. Коротича, Б.В. Линчевского, А.Л. Соболевского и А.Л. Рутковского.

Математическим моделированием процесса обжига железорудных окатышей по зонам термообработки посвящены работы Ю.С. Юсфина, Т.Н. Базилевича, Б.А. Боковинова, Н.А. Спирина, А.Н. Дмитриева, А.А. Солодухина, В.А. Кривоносова и др.

Математическим моделированием металлургических процессов в АСУ ТП посвящены труды А.М. Давидсона, А.Л. Рутковского, В.В. Лаврова, В.Г. Лисиенко, Л.Ш. Цемехмана, В.А. Арутюнова, Н.Г. Агеева и др.

**Объект и предмет диссертационного исследования** – титаномагнетитовые руды, окатыши; моделирование и оптимизация технологии получения окатышей.

**Целью диссертационной работы** является разработка математических моделей процессов формирования и спекания титановых окатышей с целью совершенствования технологии, определения оптимальных параметров процесса, позволяющие улучшить качество продукта, а также разработка устройства для производства титановых окатышей.

**Основные задачи исследования.** Для достижения цели необходимо решить целый ряд научно-технических задач, в том числе:

1. Разработка математической модели процесса получения сырых окатышей в окомкователе барабанного типа.
2. Повышение эффективности на основе математического моделирования и оптимизации технологического процесса получения титановых окатышей в зоне сушки обжиговой машины.
3. Поиск оптимальных параметров и разработка технических решений позволяющих реализовать оптимальные режимы процесса.
4. Разработка технического результата для достижения оптимального режима обжиговой машины и повышения качества готовой продукции путем контроля влажности и газопроницаемости шихты.

**Методология и методы диссертационного исследования.** В качестве исследовательских подходов в работе используются методы математического моделирования и оптимизации, обработки экспериментальных данных. Методологической базой диссертационной работы являются работы В.И. Коротича, А.Л. Рутковского, В.А. Кривоносова и др.

**Научная новизна.** Научная новизна диссертационной работы заключается в исследовании и совершенствовании технологических процессов в производстве титановых окатышей методами математического моделирования и оптимизации, в получении новых результатов по зонам формирования и спекания окатышей.

1. Синтезирована детерминированная математическая модель образования сырых окатышей с использованием органического связующего вещества – сульфитно-спиртовой барды (ССБ), учитывающая массу и количество

частиц, позволяющая характеризовать взаимодействие исходного концентрата с ССБ.

2. Впервые предложена детерминированная математическая модель процесса сушки движущейся плотной многослойной массы окатышей, позволяющая оптимизировать энергоресурсоэффективность сложной динамической теплотехнологической системы производства титановых окатышей.

3. Разработана математическая модель в виде уравнений регрессии, связывающая основные параметры технологического процесса. Получены новые результаты, впервые установлены зависимости газопроницаемости слоя шихты, усадки слоя, насыпной массы и скорости перемещения в зоны сушки от влажности шихты.

4. Разработано устройство для производства титановых окатышей. Предложена система экстремального регулирования, непрерывно поддерживающая оптимальную влажность шихты, обеспечивающая максимальную газопроницаемость слоя шихты и оптимальные показатели технологических параметров процесса при воздействии неуправляемых помех (Патент РФ № 2 791 307).

#### **Основные выводы и положения, выносимые на защиту:**

1) Математическая модель процесса формирования окатышей в виде системы дифференциальных уравнений и обобщение полученных результатов экспериментально-статистическими методами, описывающие взаимодействие твердых компонентов шихты с сульфитно-спиртовой бардой, в результате чего при перемещении этих компонентов в окомкователе формируются окатыши.

2) Математическая модель процесса сушки в обжиговой машине, входами которых являются только контролируемые параметры технологического процесса.

3) Процедура оптимизации режима, которая позволяет осуществлять поиск максимальной газопроницаемости слоя шихты и оптимальные показатели



технологических параметров процесса в группах зон обжиговой машины, при которых обеспечивается оптимальная влажность.

4) Устройство для производства титановых окатышей. Управление количеством влаги подаваемой в окомкователь осуществляется системой регулирования разрежения и расхода воздуха. При стабильном разрежении и оптимальном расходе воздуха достигается максимальная газопроницаемость.

**Теоретическая и практическая значимость:** заключается в исследовании технологии и достижении более точного контроля параметров процесса методами моделирования и оптимизации. Новизна технических решений и практическая значимость работы подтверждена патентом на изобретение «Устройство для производства титановых окатышей». Результаты и основные положения работы используются в учебном процессе СКГМИ (ГТУ).

**Достоверность диссертационного исследования** подтверждается: соответствием результатов теоретических и экспериментальных исследований; результатами разработанного устройства для производства титановых окатышей.

**Апробация результатов исследования.** Результаты исследования, проведенного в диссертации, были представлены и обсуждены:

- I Международной научно-практической конференции «Современные тенденции развития информационных технологий в научных исследованиях и прикладных областях». Владикавказ, 2020.
- II Всероссийской научно-практической конференции «Современные научно-технические и социально-гуманитарные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации». Владикавказ, 2020.
- III Международной научно-практической конференции «Современные тенденции развития информационных технологий в научных исследованиях и прикладных областях». Владикавказ, 2022.
- IV Всероссийская научно-практическая конференция «Современные научно-технические и социально-гуманитарные исследования актуальные вопросы, достижения и инновации». Владикавказ, 2022.

- LXIX Международной научно-практической конференции «World science: problems and innovations». Пенза, 2022.
- IV Международной научно-практической конференции «Современные тенденции развития информационных технологий в научных исследованиях и прикладных областях». Владикавказ, 2023.

**Личный вклад автора** состоит в постановке задач исследования, непосредственном участии в проведении экспериментов, обработке и интерпретации результатов исследований, выборе и использовании методов математического моделирования и оптимизации, проверке полученных результатов, а также подготовке материалов к публикации.

**Публикации по работе.** Основные результаты исследования были опубликованы в 12 печатных работах, в том числе в 3 статьях, которые вошли в перечень рецензируемых научных изданий ВАК, в которые должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата наук. Включает 1 статью из журнала, входящего в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получен 1 патент на изобретение РФ.

**Соответствие диссертации научной специальности.** Диссертационная работа соответствует паспорту научной специальности 2.6.2 – Metallургия черных, цветных и редких металлов п. 15 «Подготовка сырьевых материалов к металлургическим процессам и металлургические свойства сырья», п. 26 «Математическое моделирование процессов производства черных, цветных и редких металлов, формирования техногенных месторождений и способов их утилизации. Управление и оптимизация металлургическими процессами».

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из содержания, введения, четырех основных глав с выводами, общих выводов, содержит 120 страниц машинописного текста, включая 13 таблиц, 23 рисунков и список использованных источников из 139 наименований.

# 1. СОСТОЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ОКАТЫШЕЙ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЙ

## 1.1 Титан: обзор ресурсов и методов производства

Анализируя положение дел в титановой промышленности и перспективы ее дальнейшего развития, необходимо, прежде всего, дать общую оценку сырьевой базы титана, его использования и рынка, технологии, основного оборудования и экономически производства этого металла.

Титан является переходным металлом, часто используемым для создания высокопрочных, коррозионностойких и жаропрочных сплавов в промышленности. Несмотря на то, что титан присутствует в земной коре на 0,6 %, он является популярным конструкционным металлом, использование которого отстает от других цветных металлов из-за высоких производственных затрат. Он четвертый металл после железа, магния и алюминия, но его высокая стоимость не позволила ему полностью раскрыть свой потенциал в промышленности, сделав его экзотическим [1, 2]. Устаревшие технологии, оборудования, высокие потери энергии и материалов относятся к числу проблем, влияющих на производство титана [3]. Все основные металлы уступают титану по некоторым механическим и химическим свойствам, но титан остается неосвоенным [4].

Китай, РФ, Австралия, Канада, Индия, Норвегия, США и ЮАР обладают крупнейшими месторождениями титаносодержащих минералов. РФ уступает в мире только Китаю по запасам диоксида титана (490 млн. т  $TiO_2$ ). Большинство подтвержденных запасов находятся в коренных месторождениях (55 %), из которых 40 % метаморфизованные месторождения, остальное россыпные. Коренные месторождения представлены в основном титаномагнетитовыми (Чинейское, Пудожгорское, Подлысанское месторождения и др.) и ильменит титаномагнетитовыми (Медведевское, Копанское, Кручининское, Куранахское

месторождения и др.) рудными типами [5, 6]. Химический состав концентратов месторождений титаномагнетитов России представлен в таблице 1.1.

Таблица 1.1.

Химические составы титаномагнетитовых концентратов различных месторождений России

Компонент	Содержание, %						
	Зона Сибири			Дальний Восток			Кольский п.о.
	Большой Сейим	Куранахское	Чинейское	Халактырское	Кокша-ровское	Рейдовское	Хибинское
Fe <sub>общ</sub>	64,50	62,50	55,21	57,00	60,80	59,60	57,90
FeO	28,10	31,76	27,38	32,70	24,91	32,80	37,41
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	61,30	54,17	48,45	44,60	59,18	48,70	41,13
TiO <sub>2</sub>	3,00	7,45	13,08	10,30	8,30	10,10	16,90
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,89	1,05	1,34	0,65	0,52	0,45	0,49
SiO <sub>2</sub>	2,12	0,24	2,38	2,63	3,17	3,22	1,61
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,60	3,00	4,49	3,25	0,71	0,85	0,32
MgO	1,08	0,74	2,07	4,10	1,05	1,74	0,31
CaO	0,35	0,08	0,31	0,19	1,90	0,90	0,20
MnO	0,04	0,25	0,06	0,42	0,25	0,70	1,42
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01	0,51	0,03	0,22	0,07	–	0,03
(K,Na) <sub>2</sub> O	0,40	0,43	0,36	0,53	–	0,46	0,25
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,20	0,10
S	0,090	0,002	0,060	0,012	0,010	–	0,030
Итого	100,00	99,69	100,02	99,62	100,09	100,12	100,20

В российской титановой промышленности всего два металлургических передела: АВИСМА (г. Березники, Пермская область) создает титановую губку, а Верхнесалдинское металлургическое производственное объединение (ВСМПО) использует эту губку для производства металла и проката. В производстве используется ильменитовый концентрат Вольногорского горно-металлургического комбината (64% TiO<sub>2</sub>) [7-9].

#### Основные руды и минералы

Титан не встречается в природе в виде чистого металла; он в основном находится в химическом сочетании с кислородом и встречается примерно в 60 минералах. Наиболее важными полезными ископаемыми являются ильменит FeTiO<sub>3</sub> и минералы двуокиси титана рутил, анатаз и брукит, которые, хотя все они имеют одинаковую формулу, различаются по своей кристаллической структуре. Лейкоксен является продуктом окисления ильменита и состоит из мелкокристаллического рутила. Титан распространен в магнетите, а его

разновидности, богатые титаном (2-20 %), называются железотитановым магнетитом или титаномангнетитом. Среди менее распространенных минералов псевдобрукит  $\text{Fe}_2\text{TiO}_5$ , перовскит  $\text{CaTiO}_3$ , гейкилит  $(\text{Mg}, \text{Fe}) \text{TiO}_3$  и пирофанит  $\text{MnTiO}_3$  также присутствует оксид титана. Титанит, ранее известный как сфен, является единственным силикатным минералом, основным компонентом которого является титан.

Ильменит обычно встречается в виде смесей  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{FeO}$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , при этом содержание  $\text{TiO}_2$  увеличивается с 49 до 75 % по мере окисления минерала и выщелачивания железа подземными водами. Измененный ильменит (60-75 %  $\text{TiO}_2$ ) обычно аморфен, но в стадии лейкоксена (76-90 %  $\text{TiO}_2$ ) начинает проявляться определенная кристаллическая структура рутила. Для продуктов изменения ильменита, содержащих 75-92 %  $\text{TiO}_2$ , предложено название «псевдорутил». Конечные продукты изменения имеют структуру либо рутила, либо анатаза и содержат 92 %  $\text{TiO}_2$  [10].

Важные месторождения ильменита находятся в Австралии, Китае, Норвегии, Канаде, Мадагаскаре, Индии, ЮАР и Вьетнаме, а рутила – в США, Индии, Сьерра-Леоне и ЮАР [11]. Ильменит и рутил – два основных промышленных титановых минерала, используемых в основном для производства титановых металлов и пигментов на основе диоксида титана [12].

### Свойства

Титан представляет собой металлическое соединение серебристо-белого цвета со следующими свойствами: парамагнетизм, высокая коррозионная стойкость, низкая электро- и теплопроводность, низкая плотность. Титан на 45 % легче стали и имеет такую же прочность. Он вдвое прочнее, но на 60 % тяжелее алюминия. По сравнению со сталью или алюминиевыми сплавами титан имеет более низкую теплопроводность и коэффициент расширения. Чистый титан ковкий и пластичен, но при загрязнении дополнительными элементами, такими как углерод и азот, он становится хрупким.

Титан имеет сильное сродство к кислороду, углероду и азоту, что затрудняет его получение в чистом виде. Он горит на воздухе при температуре

около 1200 °С и в кислороде при 610 °С, и является единственным элементом, который горит в азоте при температуре около 800 °С. Он растворим в горячей воде, серной и плавиковой кислотах, нерастворим в холодной воде.

### Методы производства

Существует два основных метода производства диоксида титана: традиционный сульфатный процесс и более современный хлоридный процесс, на долю которого в настоящее время приходится более 50 % производственных мощностей. Для каждого требуется разное сырье. В сульфатном процессе ильменит с 45-65 %  $TiO_2$  или титановый шлак с 70-72 %  $TiO_2$  растворяют в серной кислоте с образованием сульфата титанила и сульфата железа. Титан осаждают путем гидролиза, а затем фильтруют, промывают и прокаливают для получения  $TiO_2$ . Недостатком этого метода является образование значительных кислотных отходов сульфата железа, что вызывает широкое беспокойство и критику в отношении окружающей среды.

Процесс хлорида требует сырья с более высоким содержанием  $TiO_2$ , такого как рутил, синтетический рутил или шлак с более чем 85 %  $TiO_2$ . Его смешивают с коксом высокой чистоты и хлорируют при температуре 850-950 °С в реакторе с псевдоожиженным слоем для получения тетрахлорида титана ( $TiCl_4$  или «щекотка»). Он окисляется на воздухе при повышенных температурах с образованием  $TiO_2$ , который затем прокаливают для удаления остаточного хлора и соляной кислоты. Отсутствие сточных вод и связанная с этим проблема утилизации помогли сделать хлоридный процесс предпочтительным методом на современных заводах, несмотря на недостаток сложного процесса и необходимость в сырье с высоким содержанием  $TiO_2$ .

На рисунке 1.1 приведена схема технологического процесса производства титана.



Рис. 1.1. Технологический процесс производства титана

### Металлургическое извлечение титана из его концентратов

Выделение титана из тетрахлорида титана, очищенного  $TiO_2$  и/или обогащенного титанового шлака с концентрацией  $TiO_2$  более 90 % представляет собой процессы получения титанового порошка непосредственно в качестве продуктов экстракционной металлургии. Одним из основных продуктов карботермического восстановления титановой руды, такой как ильменит, является обогащенный титаном шлак. К этой группе сырья также относятся рутил и синтезированный рутил. Для классификации этих процессов можно использовать термохимические и электрохимические методы [13].

Термохимические методы. Процессы Кролла [14, 4] и Хантера [15] обычно используются в промышленности для получения первичного металлического титана. Процесс Кролла является эталонным методом, используемым для оценки новой технологии (рисунок 1.2). Процессы Кролла и Хантера очень похожи в том (таблица 1.2), что они рассматриваются как термохимические процессы, основанные на восстановлении  $TiCl_4$  с использованием магния и натрия. По

причине, что процессы прерывистые, энергоемкие и трудоемкие, жесткие условия которых делают дорогостоящими, исследователи ищут варианты замены этих процессов более быстрой альтернативой, требующей меньше труда и энергии.

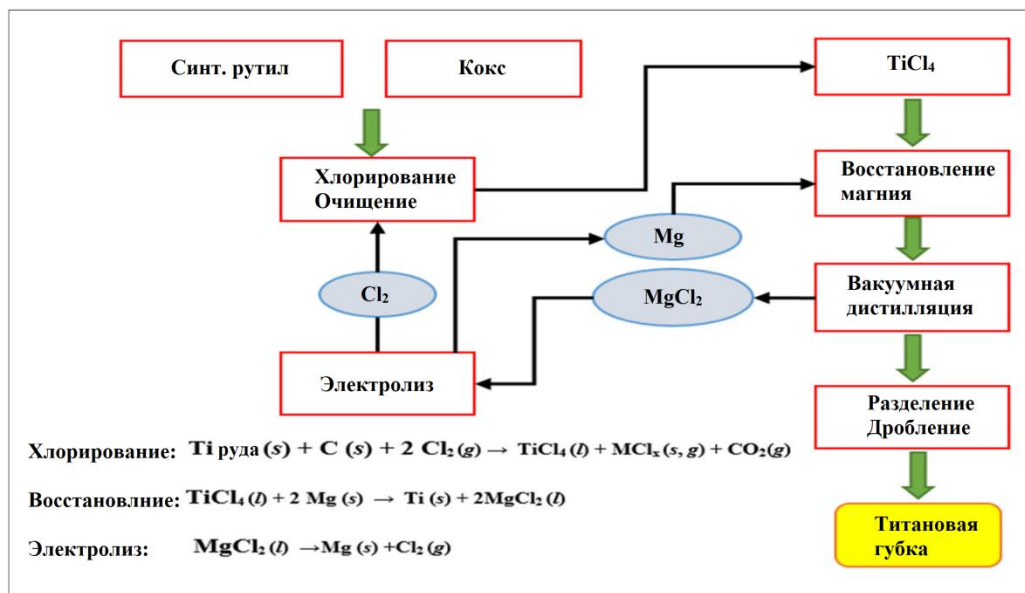


Рис. 1.2. Схема и реакции процесса Кролла производства титановой губки

Таблица 1.2.

#### Сравнение процессов Кролла и Хантера

Процесс Кролла	Процесс Хантера
партия	не длится вечно
10-15 % избытка магния	небольшой избыток $\text{TiCl}_4$
мало штрафов	штраф до 10 %
трудно исправить	легко исправить
сильное загрязнение железом стенок автоклава	незначительное загрязнение железом стенок реторты
губка промытая или дистиллированная в вакууме	выщелоченная губка
реторта содержит в основном титан	реторта содержит 4 моля $\text{NaCl}$ на каждый моль титана

Существуют также множества процессов такие как процессы Армстронга,  $\text{TiRO}$ , металлгидридного восстановления (MHR), электронного опосредованного сокращения (EMR), уменьшения заготовок, восстановления магния с помощью водорода (HAMR) и т.д.

Электрохимическим методам относятся процессы Кембриджский FFC, Оно и Сузуки (OS), а также Квебекский процесс производства железа и титана (QIT).

#### Применение



Около 95 % титановой руды перерабатывается в диоксид титана, известный как белый титан. Это блестящий белый нетоксичный пигмент, используемый в качестве отбеливающего или загущающего агента в красках, лаках, пластмассах, текстиле, резине, бумаге, стекле, глазури и печатных красках. Химическая инертность, высокая белизна, непрозрачность, высокий коэффициент преломления и светорассеивающие свойства делают его особым белым пигментом.

Непигментирующие виды использования титановой руды в основном связаны с производством титанового металла, но также включают производство различных соединений титана для промышленного использования, использование рутила в производстве флюсов для сварочных электродов и использование ильменита в качестве бурового раствора и абразива.

Титан и титановые металлические сплавы используются для изготовления деталей самолетов, космических кораблей, ракет и судов благодаря своей высокой прочности, легкому весу и устойчивости к коррозии. Титан относительно инертен, что позволяет использовать его в качестве заменителя костей и хрящей в хирургии, а также в качестве покрытия для труб и резервуаров в пищевой промышленности. Она более устойчива к воздействию соленой воды, чем нержавеющая сталь, и поэтому используется в теплообменниках на опреснительных установках. Сплавы титана используются в металлургии, чтобы удалить кислород и азот из расплавленного металла, например, стали. Титан используется в качестве легирующего агента во многих сталях для снижения содержания углерода, в алюминии – для уменьшения размера зерна, а в меди – для упрочнения.

Титан все чаще применяется в потребительских товарах, таких как головки клюшек для гольфа, а также в качестве корпусов для высококачественных часов и фотоаппаратов.

Гидрид титана  $TiH_2$  используется в порошковой металлургии, в производстве водорода, в качестве газопоглотителя в вакуумных трубках, в производстве пенометаллов. Титанат бария  $BaTiO_3$  широко используется в

электронной промышленности из-за его высокой диэлектрической проницаемости. Органические щелочные титанаты используются в качестве гидроизоляционных материалов. Триоксид титана  $TiO_3$  используется в стоматологическом фарфоре. Тетрахлорид титана  $TiCl_4$  используется для получения металлического титана, для скайрайтинга и изготовления дымовых завес, в качестве катализатора полимеризации этилена, протравы в текстильной промышленности, искусственного жемчуга и титановых пигментов. Трихлорид титана  $TiCl_3$  используется в качестве катализатора при производстве полипропилена. Нитрид титана  $TiN$  используется в металлокерамике и полупроводниковых приборах. Сульфат титана  $Ti_2(SO_4)_3$  используется в качестве восстановителя в текстильной промышленности.

#### Мировое производство и потребление

Титан поставляется на мировые рынки в основном в виде ильменитового концентрата, рутилового концентрата, синтетического рутила (92-94 %  $TiO_2$ , полученного после выщелачивания железа из ильменита) и титансодержащего шлака (75-85 %  $TiO_2$ , полученного при электротермической плавке ильменита). Около 5% мировой потребности в титановых минералах удовлетворяется за счет низкосортного ильменита (включая титаномагнетит с содержанием  $TiO_2$  до 20 %), который используется в качестве металлургического флюса или добавки в доменную печь [16]. Также используются небольшие объемы лейкоксена (87-91 %  $TiO_2$ ) и анатаза (90-95 %  $TiO_2$ ), но на эти минералы в настоящее время приходится менее 1 % мирового потребления титановых минералов. Перовскит, брукит, титанит и другие минералы титана в настоящее время не используются в коммерческих целях.

Анализ рынка мирового производства титановых концентратов (ильменита и рутила) за период 2001-2021 гг. (рисунок 1.3).

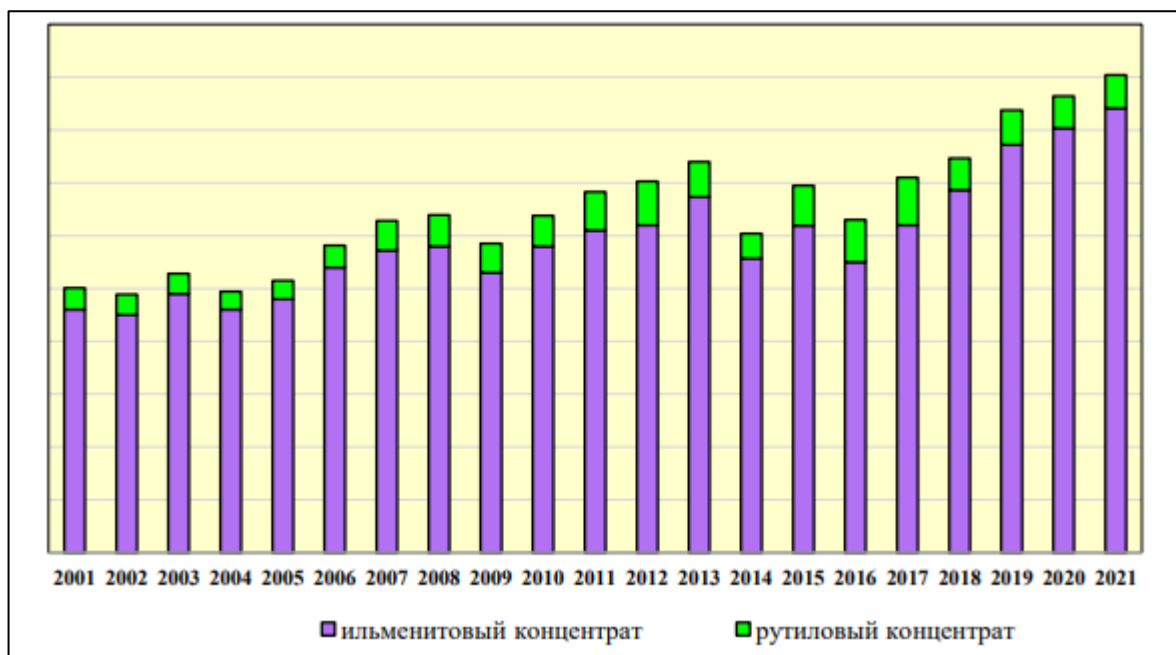


Рис. 1.3. Динамика мирового производства титановых концентратов в 2001-2021 гг., тыс. т в пересчете на 100 %  $TiO_2$

## 1.2 Развитие технологии производства окатышей

Технологические разработки на сегодняшний день. Метод производства окатышей из мелкозернистого сыпучего материала был впервые запатентован шведом Андерсоном в 1912 году. Второй патент на процесс гранулирования был выдан в 1913 году Бланкельсбергом (Германия), который опубликовал результаты первого исследования свойств гранул в 1916 году; первый промышленный завод производительностью 120 т/ч был построен в 1926 году. В Советском Союзе в начале 1930-х годов Б.П. Селиванов, И.П. Семик, В.Я. Миллер и С.Г. Матвеев исследовали новых технологий окускования железорудного сырья. Новые методы окускования рудных концентратов наиболее активно изучались американскими металлургами в 1940-х годах. Интерес к этой технологии возник в связи с проблемой низкой эффективности при агломерации мелкозернистого таконитового концентрата, получаемого при обогащении железистых кварцитов. Дэвис начал исследования по агломерации мелких концентратов в США в 1943 г., а в начале 1950-х гг. продолжил строительство ряда экспериментальных установок, что в конечном итоге привело к созданию первого промышленного прототипа завода по производству окатышей, который был открыт в 1955 г. в

Сильвер-Бей. В рядах стран Европы (Великобритания, Германия, Швеция), а также Японии в конце 1940-х годов были построены опытные заводы по производству окатышей. В начале 1950-х годов в Советском Союзе продолжались работы по производству пеллет и изучению потребительских характеристик. Первые исследования проводились в таких институтах, как «Механобр», «УралНИИХМ», «ЦНИИЧермет», «УралМеханобр» и НИТУ «МИСиС» и др. Опытные установки были созданы на ЮГОКе и НТМК в 1958 г., в 1963 г. на СГОКе и ЦГОКе, в 1964 г. на Соколовско-Сарбайском ГОКе (Казахстан) введена в эксплуатацию первая промышленная установка окомкования. С этого времени на Качканарском ГОКе (1973 г.), Лебединском, Михайловском и Стойленском ГОК (1970-1980) и на ГОК «Карельский окатыш» (1982) были введены дополнительные мощности по окомкованию. ОАО «Сибэлектросталь» (г. Красноярск) имеет мощности по производству окатышей. Производство окатышей в Российской Федерации продолжает расти и приближается к 50 млн. тонн/год, что эквивалентно более 35 % железной руды, произведенной в России в 2017 году, и около 10 % мирового производства окатышей (398 млн. тонн).

В России ОАО «ВНИИМТ», НПВП «ТОРЕКС», институт металлургии УрО РАН, ГНЦ ОАО «Уральский институт металлов» (г. Екатеринбург), НИТУ «МИСиС» и его филиалы, УГТУ-УПИ, СибГИУ занимаются научными исследованиями и опытно-конструкторскими работами в производстве окатышей. Основной целью является повышение производительности машин и улучшение металлургических характеристик окатышей. Энергосбережение и снижение потребления тепла и электроэнергии являются актуальными задачами. Особое внимание исследователей уделяется экологическим проблемам, таким как сокращение образования отходов и выбросов вредных веществ в процессе производства пеллет. Возникают вопросы снижения расхода связующего и потерь сырья, что приводит к снижению стоимости готовой продукции. Исследователи разрабатывают более эффективные методы гранулирования и термообработки окатышей. Ведутся работы по углублению использования тепла продуктов сгорания и горячих спекающихся материалов, а также по частичной замене

природного газа более дешевым органическим топливом. Технология производства окатышей остро необходима в новых областях металлургической промышленности, связанных с переработкой и утилизацией объемных промышленных отходов.

В целом, между технологиями, используемыми для производства окатышей из титанового концентрата и железорудных концентратов, нет никакой разницы. Несоответствие заключается лишь в составе концентрата и назначении конечного продукта.

Современное производство железорудных окатышей предполагает окомкование шихты в окомкователе (барабанном, дисковом) для получения сырых окатышей диаметром 12-16 мм, которые выдерживают максимальную сжимающую нагрузку 10-20 Н/ок и ударную нагрузку в 2,2-2,8 раза ( $W=8,6-8,9$  %). Электрическая энергия используется для упрочнения и формирования гранул в окомкователе. Для термической обработки пеллет в конвейерной обжиговой машине используется газовое топливо (природный газ), которое относительно дешево для производителей, со средней оптовой ценой 4 369,3 руб. за 1000 м<sup>3</sup> (2021 г.) или мазут по 21500-25500 руб/т. Температура обжига пеллет не превышает 1200-1375 °С, температура дымовых газов не превышает 225-450 °С, температура годных пеллет не превышает 120-160 °С [17].

*Основные закономерности производства сырых окатышей в барабанных/дисковых окомкователях.* Сырые окатыши получают в барабанных или дисковых окомкователях при добавлении во влажную шихту комкующих добавок – бентонита (около 1 %), извести или известкового молока, и упрочняют обжиговыми и безобжиговыми методами. Выбор оборудования для окомкования зависит от конкретных условий производства. Считают, что барабанные окомкователи менее чувствительны, чем дисковые, к колебаниям параметров (особенно влажности) шихты, имеют большую часовую производительность и проще в обслуживании.

Окатыши размером 10-20 мм сначала сушат, а потом обжигают на конвейерных обжиговых машинах при температуре около 1200-1300 °С, в

результате чего оксиды железа частично восстанавливаются и в готовых окатышах содержание восстановительного железа составляет до 40 % и выше.

Результаты исследований по получению окатышей из титаносодержащих (ильменитовых) концентратов на дисковом окомкователе с использованием в качестве связующего агента сульфитно-спиртовой барды (ССБ) показали, что 10-12 % ССБ можно получить окатыши размером 8-12 мм удовлетворительного качества. При этом производительность окомкователя составляет 1,8-2 т/ч, а влажность исходной шихты 1,5-2 % и измельчения до 55-60 % фракции менее 0,77 мм. После сушки горячим воздухом при 120-150 °С прочность составляла 30-50 кг/ок. [18].

Разработан [19] безобжиговый метод получения окатышей из титаносодержащих (ильменитовых) концентратов Иршинского и Малышевского месторождений на дисковом окомкователе. Использование в качестве восстановителя черногорского угля (содержание общего углерода 55,7 %, летучих 38,2 %, золы 27,1 %, серы 0,3 %). Оптимальные параметры процесса: влажность исходной шихты не более 1 %, содержание фракции 0,074 мм 75-80 %, влажность перед окомкованием 4,5 %, расход связующего (сульфитно-целлюлозный щелок в расчете на твердое) 4-5 %, температура сушки по зонам шахтной сушилки: первая зона 80 °С, вторая зона 120 °С, третья зона 150 °С. Полученные окатыши имеют прочность при содержании углерода 6-8 % – около 45-61 кг и при содержании углерода 11-13 % – 30-40 кг. Производительность окомкователя составляет 5 т ок./час.

Также был разработан метод [20] производства окатышей из углеродистой руды химически катализируемым способом (без сжигания). Такие окатыши еще не производились в промышленных масштабах. Шихта состоит из концентрата, извести и угля. Для ускорения процесса карбонизации загружается раствор глюкозы (катализатор). Пеллеты, полученные на дисковом окомкователе, после сушки горячим воздухом направляются в камеру карбонизации, где топочный газ, содержащий около 20-25 %  $\text{CO}_2$ , обрабатывается при температуре 40-70 °С. Полученные окатыши имеют прочность около 25 МПа и не требуют

высокотемпературного обжига для упрочнения. Получены положительные результаты в промышленности по выплавке окатышей из железного и титанового концентратов. Во многих исследованиях получение окатышей из титановых концентратов считается более экономичным по сравнению с брикетированием. Недостатком метода окомкования шихты является то, что сырье должно быть измельчено еще мельче, а процесс упрочнения должен быть отрегулирован.

### **1.3 Технология получения окатышей из титансодержащего концентрата**

Производство окатышей включает в себя множество этапов, начиная с начальной добычи сырой руды из шахты до получения продукта целевого качества [21]. Процесс начинается с мокрого измельчения ильменитового концентрата с использованием шаровой мельницы, чтобы сделать его пригодным для гранулирования. Затем ильменитовую суспензию обезвоживают с помощью вакуумного фильтра для получения надлежащего содержания воды с последующим добавлением связующего материала. Окомкование производится в барабанном или дисковом окомкователе. Сырые окатыши просеивают, чтобы отделить производственную фракцию (10-15 мм) для дальнейшей переработки. Окатыши меньшего размера возвращаются непосредственно в барабан для окомкования, а крупные дробятся перед переработкой. Для того чтобы окатыши набрали прочность и улучшили кинетические свойства их упрочняют в основном на обжиговых конвейерных машинах (ОКМ) или на установках решетчатая трубочатая печь (РТП). В настоящее время наиболее распространенным агрегатом для термообработки окатышей является ОКМ, которая совмещает операции от сушки до охлаждения окатышей [22].

На рисунке 1.4 представлена схема производства окатышей на обжиговой конвейерной машине.

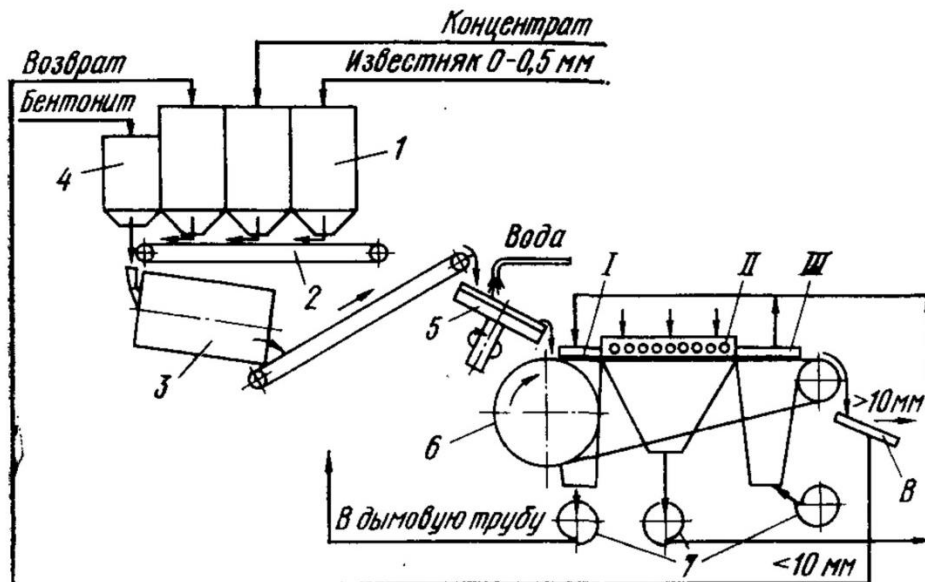


Рис. 1.4. Схема производства окатышей:

1 – шихтовые бункера; 2 – сборный транспортер; 3 – смесительный барабан; 4 – бункер для бентонита; 5 – окомкователь; 6 – обжиговая машина; 7 – вентиляторы; 8 – грохот

### 1.3.1 Подготовка шихты и основные закономерности процесса окомкования

В качестве сырья для изготовления окатышей используется титансодержащий концентрат со связующими (органическими или неорганическими), флюсом (для получения офлюсованных окатышей), твердым топливом (при необходимости) и другими добавками (возврат, огарки, известь и др.). Измельченные элементы шихты дозируются и смешиваются, затем направляются на окомкование. Шихта предварительно смачивается. Оптимальный уровень влажности шихты определяется оптимальными условиями для образования окатышей с необходимыми физическими и химическими свойствами и зависит от характеристик его компонентов. Оптимальное значение влажности окатышей, изготовленных из концентратов магнетита и гематита, обычно составляет от 9 до 9,5 %; однако по мере увеличения степени помола оптимальное содержание влаги также несколько повышается. Переувлажненный концентрат (после мокрой магнитной сепарации, флотации и т.д.) должен быть разбавлен добавлением, например, сухого мелкоизмельченного известняка для достижения требуемой влажности [23].



Общие требования к качеству шихты может заключаться следующими параметрами: стабильность химического состава; соответствие химического, минералогического и гранулометрического состава; оптимальный размер составляющих шихты; оптимальное содержание влаги.

Есть различные способы подготовки, хранения и подачи шихты на металлургическую переработку.

Известен метод подготовки сырья для производства окатышей титаномагнетитового концентрата [24]. В шихту для получения окатышей входит титаномагнетитовый концентрат, связующее, флюс, упрочняющая добавка. В состав смеси также входит оксид марганца ( $MnO$ ), который обеспечивает соотношение оксида марганца и оксида кальция от 0,05 до 0,3 и диапазон основности от 0,1 до 1,5. Технический результат изобретения заключается в усилении связи между гранулами при измельчении, что уменьшает степень их размягчения и разрушения.

Также известен способ производства окатышей из мелкого железорудного концентрата [25]. В качестве связующего вещества используется известь. Процесс включает: последовательную подачу мелкой извести и тонкоизмельченного известняка в поток влажного концентрата, перемешивание, выдержку, окомкованию и обжиг при высоких температурах. Прочностные характеристики окатышей с добавлением извести были выше, чем у окатышей с добавлением бентонита (основность шихты 0,6). В среднем прочность сырых на раздавливание, выше на 6,81 %, на удар на 8,94 %, сухих выше на 43,7 %, обожженных на 34,6 %, истираемость снизилась в 1,25 раза.

Сланцевая зола, содержащая значительное количество оксидов кальция и магния, а также мелкие коллоидные частицы, включается в качестве связующего в смесь, используемую для изготовления окатышей [26]. Это увеличивает прочность сырых окатышей. За счет повышения качества сырых окатышей этот метод позволяет полностью удалить бентонит из состава шихты, сохраняя при этом соответствующий уровень прочности готовых окатышей.

На стадии окатывания шихты, называемой окомкованием, происходит образование сырых окатышей. Окатыши должны быть произведены с соответствующим гранулометрическим составом и достаточной механической прочностью, чтобы поддерживать этапы термообработки в печи и транспортировки. В настоящее время в производстве окатышей используются барабанные (рисунок 1.5а) и дисковые (тарельчатые) (рисунок 1.5б) окомкователи.



Рис. 1.5. Окомкователи: а – цилиндрический барабанный; б – дисковый

За счет сил взаимного сцепления смесь тонкоизмельченной шихты и воды проявляет определенную термодинамическую склонность к окомкованию и способность образовывать комки небольшой прочности [27]. В основном силы связи между твердыми тонкоизмельченными частицами в шихте состоят из двух составляющих: сил Ван-дер-Ваальса и капиллярных сил.

Среди важных факторов образования сырых окатышей можно назвать: форму, средний размер, минералогию, гранулометрический состав руды и добавок, структуру пор, смачиваемость частиц, влажность, химические характеристики смеси, вид связующего и его количество, условия работы используемого оборудования, рабочие параметры гранулятора (наклон, время пребывания, вращение) и др.

Исследовательская и промышленная практика показывает, что эти окомкователи активно используются до настоящего времени и имеются

многочисленные работы по их совершенствованию и оптимизации технологических параметров.

### 1.3.2 Факторы, влияющие на процесс окомкования

*Размер частиц.* Гранулируемый концентрат должен иметь достаточно мелкое гранулометрическое распределение, которое обычно достигается путем измельчения. В целом титаносодержащая руда с меньшим размером частиц и более высокой удельной поверхностью лучше подходит для окомкования [28, 29], по крайней мере 70 % гранулируемого материала должны иметь размер фракции <44 мкм и удельную поверхность или индекс Блейна >1200 см<sup>2</sup>/г, чтобы обеспечить хорошие характеристики гранулирования. Авторы работ [30, 31] показали, что увеличение крупности частиц железной руды привело к увеличению сил между частицами и прочности сырых окатышей. Наибольшей прочности достигают окатыши с размером частиц <44 мкм. Однако следует учитывать, что производство окатышей из очень мелких частиц нецелесообразно при крупномасштабном производстве из-за большого количества энергии, потребляемой при измельчении, и трудностей с обработкой мелких материалов. Поэтому важно определить оптимальный размер частиц концентрата, подлежащего окомкованию.

*Влажность.* Влажность имеет решающее значение в процессе окомкования, т.к. она обеспечивает начальные силы сцепления для формирования сырых окатышей. Количество влаги должно быть достаточным для облегчения агломерации зерен, но не до перенасыщения. Слишком высокое содержание влаги может привести к слишком быстрому росту сырых окатышей и стать очень пластичными, в то время как слишком низкое содержание влаги делает рыхлую структуру окатышей хрупкой [28]. Содержание влаги во время гранулирования можно контролировать, добавляя связующее с высокой водопоглощающей способностью, что позволяет расти сырым окатышам с постоянной скоростью. Как правило, оптимальное содержание влаги для окомкования титаносодержащей

руды находится в диапазоне 7-9 мас. % [29, 32]. Однако это также может зависеть от свойств гранулированной шихты.

*Связующие.* Связующие необходимы при гранулировании, потому что они могут влиять на прочность окатышей на каждой стадии гранулирования. Бентонитовая глина является наиболее широко используемым связующим из-за ее эффективности, низкой стоимости и широкой доступности [33-35]. Однако бентонит представляет собой неорганический материал, который в основном состоит из кремнезема и глинозема, что увеличивает количество примесей в титаносодержащей руде, которые необходимо удалить на последующих этапах [36]. Важно, чтобы связующее не вызывало значительного загрязнения, особенно для более селективных процессов обратного восстановления, где важно высокое содержание титана и железа. Кроме того, примеси, добавляемые в виде связующего вещества, могут потребовать дополнительных затрат энергии для их удаления при последующей обработке. Поэтому альтернативные связующие для бентонитовой глины также широко изучались.

Органические связующие являются привлекательными незагрязняющими связующими, которые могут значительно повысить прочность окатышей в сыром виде [28, 37-39]. Однако органические связующие обычно воспламеняются в процессе упрочнения, что может увеличить пористость окатышей. В то время как пористость желательна для высокой способности к восстановлению, разложение органического связующего во время затвердевания может поставить под угрозу прочность обожженных окатышей. Напротив, неорганические добавки могут обеспечить высокую прочность обожженным окатышам из-за их способности выдерживать высокие температуры [40, 41], но, как правило, они не способны обеспечить силы сцепления, необходимые для сырых окатышей [42].

Был рассмотрен широкий спектр связующих, альтернативных бентониту, включая органические связующие и неорганические добавки. Некоторые из этих материалов приведены в таблице 1.3, включая их основные преимущества и недостатки.

Перечень различных вяжущих, используемых при окомковании железных руд

Тип	Связующее	Преимущества	Недостатки
Глины	Бентонит	Обеспечивает высокую прочность окатышей на каждой стадии гранулирования, относительно невысокую стоимость.	Вводит больше загрязняющих веществ в железную руду
	Нонтронит	Высокое содержание железа и низкое содержание кремнезема	Дает менее прочные окатыши, низкая доступность
Органические	Карбоксиметил-целлюлоза (КМЦ)	Не содержит диоксид кремния, отличные свойства приклеивания к сырой шихте	Плохая термическая стабильность, ведущая к низкому качеству спеченных окатышей, относительно высокая стоимость
	Крахмал	Сопоставимые свойства сырого соединения в зависимости от формы крахмала	Окатыши, как правило, липкие и имеют шероховатую поверхность, для повышения растворимости требуется подготовка связующего
	Полиакриламид	Обеспечивает достаточную прочность окатышей в сыром и высушенном виде	Дает низкую прочность при спекании
	Продукты древесины (лигносульфонат, гемицеллюлоза)	Низкая стоимость, дает сырым окатышам приемлемой прочности	Некоторые изделия из древесины содержат серу в окатышах, которая может выделяться в виде SO <sub>x</sub> во время спекания
	Органические отходы (молочные отходы, меласса, шлам)	Низкая стоимость, дает сырые и высушенные окатыши приемлемой прочности	Трудности с диспергированием и прилипанием во время гранулирования. Связующее склонно к деградации
	Клеи (эпоксидная смола)	Обладают высокой адгезионной прочностью, которая придает окатышам высокую прочность	Трудно поддается гранулированию из-за чрезмерной липкости
Неорганические	Карбонат натрия	Используется в качестве диспергатора для других связующих, может действовать как флюс при спекании	Пеллеты обладают низкой термостойкостью
	Силикат натрия	Повышает прочность спеченных окатышей за счет образования стеклообразных связующих мостиков	Не обеспечивает требуемой прочности в сырых пеллетах
	Боратные соединения	Повышает прочность окатышей при спекании за счет плавления во время спекания	Дает окатыши с низкой прочностью в сыром и высушенном состоянии

	Цемент (портландцемент, глиноземистый цемент)	Обеспечивает высокую механическую прочность окатышей после отверждения	Разлагается при высоких температурах, требует больших доз и длительного времени отверждения
	Известь	Может действовать как флюсующий агент, который может увеличить прочность спеченных окатышей	Производит сырые и высушенные окатыши с низкой прочностью

### 1.3.3 Термообработка окатышей на обжиговых конвейерных машинах

Современные ОКМ имеют 5 основных технологических зон: сушки, нагрева, обжига, рекуперации и охлаждения. В свою очередь зона сушки подразделена на три подзоны: в первой подзоне газ-теплоноситель проходит свой окатышей сверху вниз, во второй – снизу вверх и в третьей опять сверху вниз. Такой режим сушки с реверсом теплоносителя обеспечивает ее максимальную интенсивность без разрушения и переувлажнения окатышей.

В зоне подогрева окатыши плавно нагревают до 350-400 °С, затем следует зона обжига, где окатыши нагревают до максимальной температуры обжига 1200-1300 °С. После зоны обжига окатыши попадают в зону рекуперации, где верхние горизонты слоя окатышей охлаждают горячим воздухом 700-800 °С из первой подзоны охлаждения, а нижние прогревают за счет переноса тепла из верхних. В зонах подогрева – рекуперации горячие газы проходят слой окатышей сверху вниз. Охлаждение окатышей осуществляют продувкой холодного воздуха. Зона охлаждения огнеупорными перегородками разделена на три подзоны.

Сжигание топлива проводят в выносных камерах горения (фор камерах) зон подогрева и обжига с помощью специальных горелочных устройств. Обычно в качестве топлива используют природный газ или мазут. В последнее время на некоторых фабриках из-за дефицита нефти и газа перешли к сжиганию газа пиролиза твердого и пылевидного топлива [43, 44].

Существует способ получения окатышей, с помощью которого можно получить более устойчивые окатыши к истиранию и разрушению [45]. Сущность способа заключается в следующем: определенная часть сырых окатышей

первоначально размещается на движущейся решетке и подвергается к сушке. После этого оставшуюся часть общей загрузки сырых окатышей добавляют к высушенной части шихты на движущейся решетке, а затем всю шихту сушат и прокаливают для получения в результате окатышей с более прочными частицами.

В работе [46] рассматривается устройство, относящееся к получению термоупрочненных окатышей различного назначения. Оно в себе включает подвижную решетку с трехсекционной зоной сушки, зоной нагрева, обжига и рекуперации, четырехсекционной зоной охлаждения окатышей. Центральный коллектор, состоящий из двухсторонних сливных труб с форкамерами по обеим сторонам, соединяет первую часть зоны охлаждения по ходу движения окатышей с неотопливаемой зоной нагрева. Два боковых перепускных коллектора со сливными стаканами, снабженными форкамерами с горелками зоны обжига, связывают первую секцию охлаждения со второй секцией охлаждения. Третья секция охлаждения соединена с третьей секцией зоны сушки. Площади первой секции охлаждения и зоны восстановления сравниваются в соотношении 1,4:2,0, а площади зоны обжига и второй зоны охлаждения сравниваются в соотношении 1,35:1,60. Расходы воздуха первой и второй частей зоны охлаждения при нормальных условиях и осуществлении способа получения окатышей составляют 1,15-1,25. Устройство обеспечивает интенсификацию процессов теплообмена, снижение удельных расходов энергоносителей.

*Условия спекания.* Предполагается, что разные типы руд будут иметь разный минералогический состав. Таким образом, различное сырье требует различных условий спекания окатышей, таких как температура, продолжительность и атмосфера. Например, окатыши гематита требуют более высоких температур спекания  $\geq 1300$  °C по сравнению с окатышами магнетита (~1250 °C). Это связано с тем, что при окислении магнетита в гематит во время отверждения выделяется тепло (482,4 кДж/моль  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). Окисление магнетита не только увеличивает выделение тепла, что способствует более интенсивному спеканию, но также обеспечивает более равномерное распределение тепла внутри окатышей [47]. Окатыши магнетита начинают окисляться при 900 °C и достигают

максимальной прочности при температуре спекания 1250 °С [48]. При отверждении гематитовых окатышей это экзотермическое тепло отсутствует, поэтому гематит труднее гранулировать и его необходимо офлюсить для достижения требуемой прочности после спекания [28, 49]. В связи с быстрым развитием промышленности по производству окатышей и нехваткой сырья для окатышей хорошего качества для производства спеченных окатышей необходимо использовать другие типы концентратов. Важно понимать их поведение при спекании, чтобы определить оптимальные условия спекания для достижения заданной прочности при спекании.

#### **1.4 Современные технологии получения окатышей**

*Технология ТОРЭКС.* В настоящее время НПВП «ТОРЕКС» одна из немногих компаний в России, которая модернизирует существующие обжиговые машины, разрабатывают современные тепловые системы, вводят в эксплуатацию новые установки окомкования и доводят их до проектной мощности.

Современные обжиговые машины оснащены усовершенствованной системой сжигания газа. Система включает в себя коллектор (9), газоход (10), скруббер (11) и продувочное устройства (12) и обеспечивает функцию температурной фильтрации при термообработке слоя окатышей в различных технических зонах обжиговой машины. В зоне высокотемпературного нагрева и обжига устанавливается горелочное устройство (14) для обеспечения и регулировки температурного режима (рисунок 1.6).



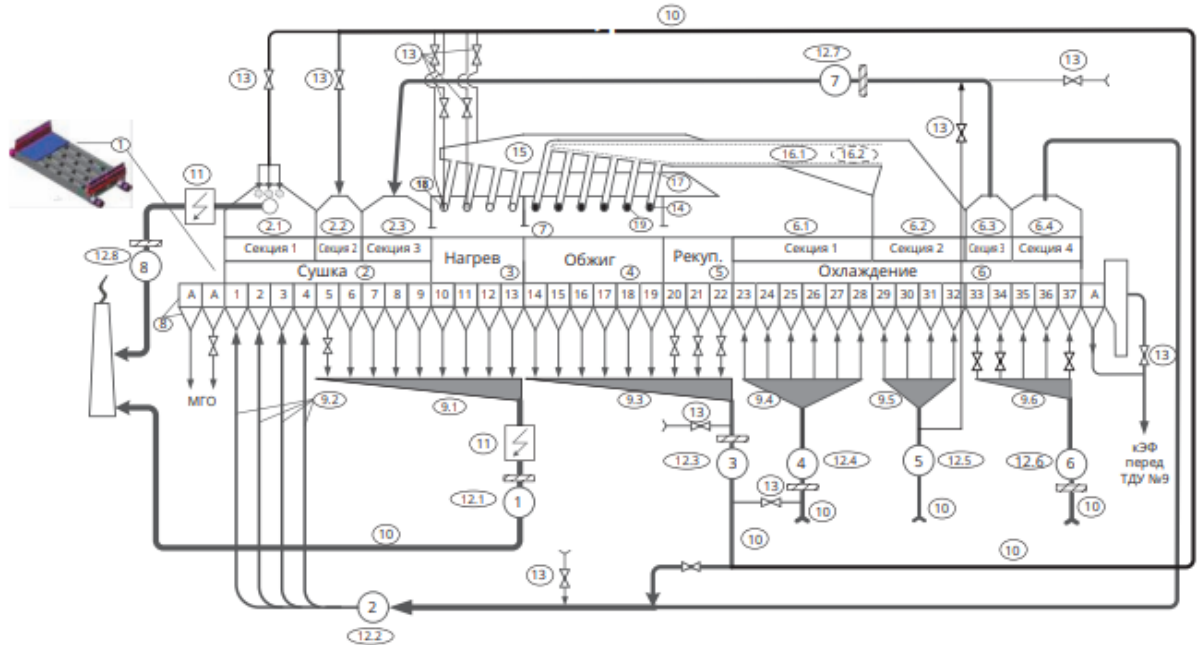


Рис. 1.6. Тепловая схема энергоэффективной обжиговой машины нового поколения МОК-1-592М

В большинстве обжиговых машин, эксплуатируемых сегодня, применяется классическая технология двухсекционной сушки окатышей путем инвертирования зоны сушки с использованием метода «продув-просос» носителя тепла. В этом случае в качестве теплоносителя используется горячий воздух или отработанный газ, который передается из других технических зон обжиговой машины через систему воздушных каналов. Недостатками этого метода являются образование чрезмерно влажных зон при послойной сушке, что ограничивает возможность улучшения теплообмена процесса сушки, риск разрушения и размягчения крупных гранул в разных слоях, а также газопроницаемость слоя пеллет как в зоне сушки, так и в зоне нагрева и последующего высокотемпературного обжига, которая значительно снижается [50].

Представлена более совершенная технология [51] обратной сушки в трехсекционной зоне, позволяющая ограничить влияние избыточной влаги на качество и структуру окатышей, структуру слоя и газопроницаемость, а также исключить возможность разрушения окатышей в верхней части слоя (рисунок 1.6, поз. 2.1-2.3). На ОКМ Лебединского и Михайловского ГОКа серийно установлена

трехсекционная зона сушки, что позволило увеличить их производство на 15-20 % при сохранении высокого качества окатышей.

Необратимый двухслойный способ сушки, при котором каждый слой толщиной до 200-250 мм загружается отдельно и сушится по очереди, является еще одним чрезвычайно эффективным способом [52] послышной сушки сырых окатышей, используемых в тепловом расчете обжиговых машин. Тем не менее, использование этой технологии выявило конструктивные проблемы в механизме загрузки начального (нижнего) слоя сырых окатышей, которые не в полной мере обеспечивают ожидаемую эффективность и результативность данного метода.

Исследователями НПВП «ТОРЭКС» была создана общая математическая модель, которая использовалась для вычислительного анализа в период 2002-2012 гг. [53, 54]. Согласно исследованиям, предложенный способ подачи горячего воздуха с повышенным кислородным потенциалом в зону нагрева позволяет поддерживать требуемое качество при снижении удельного расхода топлива на 8-15 % и повышении производительности машины на 10-17 % в зависимости от исходных характеристик пеллет.

*Технология HAVER & BOECKER NIAGARA.* Компания HAVER & BOECKER NIAGARA (Германия) также разрабатывает и оптимизирует процессы, машины и оборудование. Испытательный центр компании располагает широким спектром оборудования для испытания окатышей. Целью HAVER Process Engineering является удовлетворение технических требований и получение экономической выгоды. Для этого необходимо уделять внимание всем этапам процесса гранулирования, начиная с подготовки сырья, подачи и смешивания, а также обработки связующего. Ключевые элементы гранулирования подробно рассматривают классификацию конечного продукта, циркуляцию сырья, а также минимизацию усилий по удалению пыли, безопасность и защиту окружающей среды. Применение признанных технических норм и стандартов с индивидуальной обработкой приводит к производственному процессу, который экономит энергию и ресурсы.

Дисковый окомкователь Scarabaeus компании HAVER & BOECKER NIAGARA используется для непрерывного и эффективного производства железорудных окатышей. Такая конструкция сводит к минимуму возврат нестандартного продукта, тем самым повышая производительность и рентабельность. Окомкователь, который агломерируют железорудный концентрат в окатыши, характеризуется очень узким гранулометрическим составом целевого продукта в диапазоне от 10 до 14 мм. Сырье в виде порошка формируется в окатыши с жидким связующим или без него в наклонных, цилиндрических и вращающихся дисках. Оптимальные рабочие параметры могут быть настроены путем изменения угла наклона, скорости вращения и циркуляции материала. Благодаря внедрению новых технологий инновационная система автоматического управления дисковым окомкователем позволяет изменять высоту подъема боковых стенок.

Рабочая зона окомкователя (рисунок 1.7) представляет собой горизонтально наклоненный вращающийся цилиндрический сосуд. Мелкий железорудный концентрат гранулируется в сырые окатыши размером 9-16 мм путем распыления воды. Эти окатыши выкатываются из разгрузочного лотка на конвейерную ленту и транспортируются на роликовый грохот. Роликовый грохот сортирует окатыши на крупнозернистые, мелкие и кондиционные. Сырые окатыши большего и меньшего размера будут переработаны; окатыши кондиционного размера направляются на обжиг. На процент переработанных сырых окатышей большего и меньшего размера напрямую влияет работа дискового окомкователя [55].



Рис. 1.7. Дискový окомкователь Scarabaeus компании HAVER & BOECKER NIAGARA

На рисунке 1.8 приведена технологическая схема получения окатышей компании HAVER & BOECKER NIAGARA.

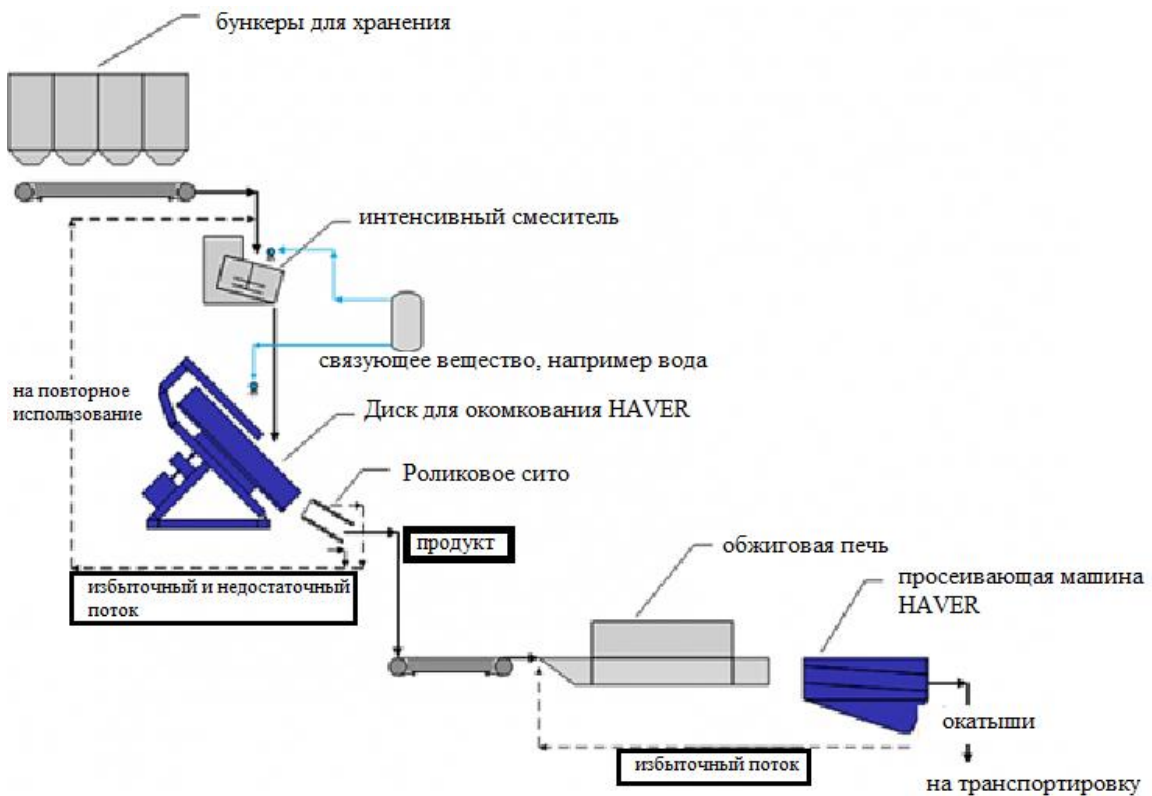


Рис. 1.8. Технологическая схема производства окатышей по технологии HAVER & BOECKER NIAGARA

*Система гранулирования Kobelco.* На рисунке 1.9 показана технология производства окатышей Kobelco (Япония). Мелкоизмельченное сырье смешивается со связующим и гранулируется в сырые окатыши диаметром около

12 мм. Эти окатыши сушат, предварительно нагревают, обжигают и охлаждают, превращая в гранулы продукта.

Гранулы продукта имеют сферическую форму с высокой прочностью и, таким образом, создают мало пыли при транспортировке. Грануляция осуществляется дисковым или барабанным окомкователем. Обжиг осуществляется в системе охладителя с колосниковой печью, приспособленной для системы гранулирования Kobelco, или в системе с прямой колосниковой решеткой, аналогичной той, которая используется для агломерационной установки.

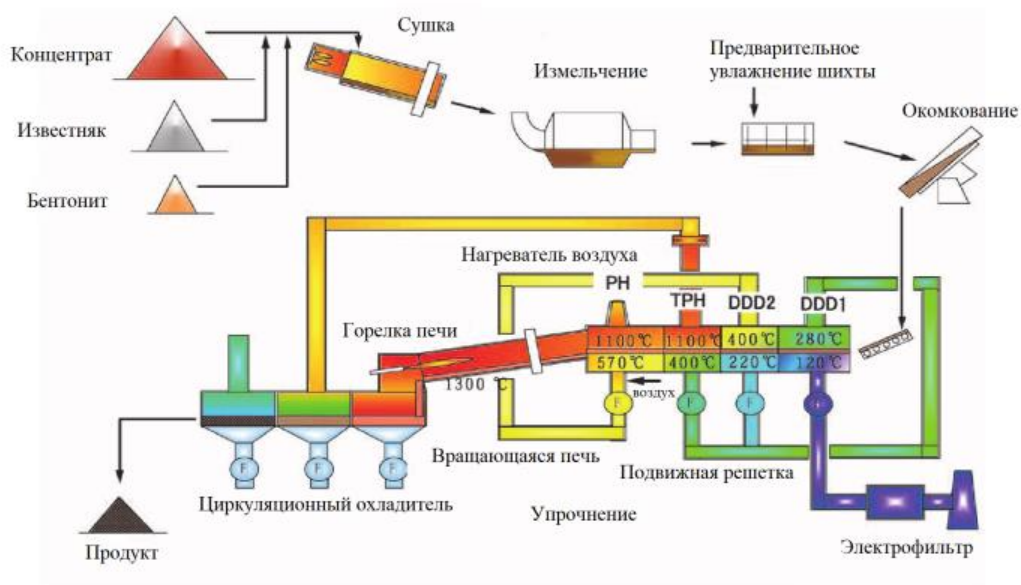


Рис. 1.9. Технология производства окатышей Kobelco

В технологии гранулирования от Kobelco используется печь для сжигания, заменяющая дорогую нефть и газ дешевым углем в качестве основного топлива. Тем не менее, в уголь входит некоторое количество золы, которая может скапливаться и прилипать к внутренней части печи и препятствовать прохождению газа в печи. Для предотвращения подобных неприятностей было разработано несколько мер. Было обнаружено, что из всех этих мер особенно эффективными являются сокращение пламени горелки печи и использование более тонкого помола угля. Это подтверждается и реальной эксплуатацией. В случае, когда пламя достигает внутренней стены печи, угольная зола достигает стены в расплавленном состоянии, оседая на поверхности стены и прилипая к ней.

Когда пламя короче, пепел охлаждается до того, как достигнет внутренней стенки, и затвердевает, что предотвращает его прилипание к стенке [56].

Таблица 1.4

Сравнение технологий TOREX, Haver &amp; Boecker Niagara и Kobelco

Наименование	Технологическая схема	Преимущества	Недостатки
TOREX (Россия)	дисковый окомкователь, обжиговая конвейерная машина с подвижной колосниковой решеткой	высокая производительность ОМ, гибкая схема зоны сушки, строгий баланс газовых потоков, энергоэффективность	ограниченная возможность форсировать тепло- массообменные процессы в зоне нагрева
Haver & Boecker Niagara (Германия)	дисковый окомкователь SCARABAEUS® 7500	автоматическое управление окомкователем во время работы, снижение выбросов CO <sub>2</sub> , повышение качества продукции, увеличение объема выпуска продукции	узкий диапазон гранулометрического о состава исходного материала
Kobelco (Япония)	дисковый/барабанный окомкователь + система с прямой колосниковой решеткой	замена дорогого топлива более дешевым сырьем	прилипание и нарушение проход газа в печи

## 1.5 Современные методы математического моделирования и оптимизации в производстве окатышей

### 1.5.1 Анализ известных математических моделей процесса формирования окатышей

Каждый изучаемый процесс может быть описан математической моделью, которая отражает индивидуальные характеристики субъектов исследования [57]. Кинетика образования окатышей является одним из важных вопросов в процессе окомкования. Формирование окатышей, т.е. превращение исходного сыпучего материала в окатыши в зависимости от времени пребывания материала с учетом работы окомкователя, изучалось многими исследователями, и приведены в большом количестве работ.

Математическим моделированием процесса обжига железорудных окатышей по зонам термообработки посвящены работы Ю.С. Юсфина, Т.Н. Базилевича, Б.А. Боковинова, В.А. Кривоносова, Н.А. Спирина, А.Н. Дмитриева, А.А. Солодухина и др.

Математическим моделированием металлургических процессов в АСУ ТП посвящены труды А.М. Давидсона, А.Л. Рутковского, В.В. Лаврова, В.Г. Лисиенко, Л.Ш. Цемехмана, Е.И. Мешкова, В.А. Арутюнова, Н.Г. Агеева и др.

В одной из первых работ [58] по экспериментальному исследованию кинетики окомкования авторы делят процесс на три стадии: область образования ядра; этап интенсивного роста; этап дальнейшего роста гранул и их измельчение. Кинетика образования гранул сильно зависит от размера комкующих и комкуемых частиц и содержания в них влаги.

Метод наката комкуемых частиц на комкующие гранулы позволил увеличить массу гранулы во вращающемся грануляторе за счет математических расчетов, приведенных в [59].

Кинетика гранулообразования для периодического процесса по механизму расслоения и дробления с учетом уравнения баланса числа окатышей в объеме принимает следующий вид:

$$\frac{dn(x,t)}{dt} = -\beta(x,t)n(x,t) - \frac{d}{dx}[\sigma(x,F)n(x,t)] \quad (1.1)$$

Изменение объема измельченного материала

$$\frac{dF(t)}{dt} = \int_0^\infty \beta(x,t)n(x,t)x dx - \int_0^\infty \sigma(x,F)n(x,t)dx \quad (1.2)$$

где  $n(x,t)$  – количество окатышей объемом  $X$  в момент  $t$ ;  $\beta(x,t)$  – количество окатышей объемом  $X$ , разрушаемые в момент  $t$ ;  $\sigma(x,t)$  – скорость роста окатышей объемом, большим  $X$ ;  $F(t)$  – объем измельченного материала.

Полученные выражения рассматривают кинетики образования окатышей как вероятностного процесса.

Зависимость производительности окомкователя, приведенная к заданному качеству сырых окатышей приведена в работе [60]:

$$Q_n = Q_p[\gamma_1(1 - 0,1n_1) + \gamma_2(1 - 0,1n_2) + \dots + \gamma_n(1 - 0,1n_n)] \quad (1.3)$$

где  $Q_p$  – производительность окомкователя, т/час;  $n$  – количество бракованных окатышей, выброшенных из 10 испытаний для определения прочности окатышей;  $\gamma$  – выход окатышей по классам.

В работе [58] представлена модель окомкования исходя из уравнения материального баланса:

$$\frac{d\rho_i}{dt} = (K_i^H - K_i^{\rho_i} \rho_i) \rho_{i-1} - K_{i \rightarrow (i+1)} \rho_i - K_{B_i} \rho_i \quad (1.4)$$

$$\frac{d\rho_0}{dt} = \Phi_0 - K_{B_0} \rho_0 - K_1^H \rho_0 - K_i^{\rho} \rho_0 \rho_1 - \sum_{i=2}^n (K_i^H \rho_{i-1} + K_i^{\rho} \rho_{i-1} \rho_{i1} - K_{(i-1)-1} \rho_{i-1}),$$

где  $\rho_i$  – вес -й фракции;  $t$  – время окомкования;  $\Phi_0$  – производительность гранулятора;  $K_{B_i}$  – коэффициент выгрузки  $i$ -й фракции;  $K_i^H$  – коэффициент скорости начала образования  $i$ -й фракции;  $K_i^{\rho}$  – коэффициент увеличения скорости роста гранул  $i$ -й фракции.

В.Н. Брани [61] при разработке математической модели исходил из предположения, что окомкование разделяется на два этапа: этап образования (формирования) гранул и этап роста гранул. Им получена интересная зависимость, отражающая время окомкования:

$$p = \frac{A_i}{V_1 - V_2} \left[ \exp\left(-\frac{V_t}{V_1}\right) \tau + \exp\left(\frac{V_t}{V_1}\right) \tau \right], \quad (1.5)$$

где  $A_i$  – параметр, отражающий комкуемость материала;  $V_1$  и  $V_2$  – объем материала в зоне образования и роста гранул;  $V_t$  – объем материала в грануляторе в момент времени  $t$ ;  $t$  – время окомкования.

Среди значительного объема исследований течения сыпучего материала в барабане выделяется следующая работа [62]. Ниже приводится уравнение движения отдельной частицы по внутренней поверхности барабана:

$$\omega = \frac{2g}{R(1+4f^2)} \left[ 3f \sin \beta + (1 - 2f^2)(\cos \beta - e^{2f\beta}) \right], \quad (1.6)$$

где  $\beta$  – угол подъема частицы;  $f$  – коэффициент трения движения;  $\omega$  – угловая скорость движения частицы.

Подходы к построению моделей, предложенных в исследованиях упомянутых авторов, касаются некоторых вопросов кинетики и математического



моделирования задач гранулирования, и эти ответы сопряжены с рядом упрощений такого сложного технического процесса, как производство окатышей.

### **1.5.2 Анализ известных математических моделей процесса спекания окатышей**

Математическая модель процесса спекания окатышей характерна физико-химическими изменениями, которым подвергается исходный материал в процессе производства [63].

Алгоритм динамического моделирования процесса спекания включает зажигание, сушку (переувлажнение), горение топлива, обжиг и охлаждение окатышей, изменение расхода газа, плотности окатышей, теплоемкости материала и газа, факторов тепло- и влагообмена в ходе технологического процесса. Необходимо провести корректировку теплофизических характеристик шихты и окатышей, массового баланса и других хорошо изученных параметров, чтобы определить влияние различных химических изменений (в том числе минералогических), которые в настоящее время до конца не изучены и не охарактеризованы. Для математического описания некоторых из этих физических и химических процессов можно использовать набор дифференциальных уравнений без необходимости пространственных измерений и времени. Фактически зависимости коэффициента теплоотдачи, состава шихты и теплоемкости газов от температуры сохраняются не зависимо от места и времени.

Математическое описание сушки окатышей рассмотрено [64] для всего процесса сушки, основанного на балансе массы и преобразованиях энергии. Цукерман и др. [65] исследовали сушку окатышей как численно, с использованием модели сжимающейся сердцевины, так и экспериментально. В дополнение к предыдущим моделям необходима более подробная численная модель, чтобы полностью прояснить механизмы, участвующие в сушке окатышей. Также крайне важно разработать модели сушки, применимые к

различным условиям сушки, чтобы в будущем оптимизировать процесса сушки окатышей.

В работе [66] сравнивались решение «вопроса Шумана» и результаты математического моделирования тепловой работы слоя на реальной обжиговой машине. Показано, что теплообмен в слое стабилизируется медленнее и только к завершению фазы нагрева обжиговой машины за счет существования двух тепловых волн (от газа-теплоносителя из горна и за счет экзотермической реакции окисления магнетита). В классической задаче безразмерная скорость тепловой волны  $Y/Z$  приближается к единице, и теплообмен в слое вскоре стабилизируется. Постепенная стабилизация теплопередачи по всей длине машины позволяет измерять длину зоны тепловой инерции и оптимизировать температурно-фильтрационный режим на машине.

В работе [67] предложено математическое описание теплоэнергетических особенностей функционирования обжиговых конвейерных машин, учитывающее физико-химические процессы при термообработке окатышей, на основе математических моделей. Установлено, что в технологических зонах подогрева, обжига, рекуперации протекают одинаковые физико-химические процессы, различающиеся количественными характеристиками. Учитывается потребность шихты в газе-теплоносителе для соответствующих зон, содержание диоксида углерода, оксида железа и углерода в сухих окатышах, которые зависят от химического состава, степени выделения диоксида углерода, окисления оксида железа, сгорания углерода.

## **1.6 Выводы по первой главе**

Анализ и исследование известных литературных источников показывает, что методы оптимизации и математического моделирования процесса получения окатышей из титаносодержащих концентратов изучены недостаточно полно. Поэтому необходимо выполнить:

1. Разработать и исследовать математические модели в зонах подготовки шихты и формирования окатышей.
2. Разработать и исследовать математические модели для технологических зон обжиговой машины для повышения эффективности процессов и качества готового продукта.
3. Разработать устройство для контроля газопроницаемости слоя шихты, позволяющие оптимизировать технологических показателей готовых окатышей.
4. Необходимо усовершенствовать способы получения титановых окатышей в обжиговой конвейерной машине с целью повышения производительности и качества получаемых окатышей.

## 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ТИТАНОВЫХ ОКАТЫШЕЙ

Развитие титановой промышленности требует большого количества высококачественной титановой руды. Размер частиц ильменитового концентрата становится все более и более мелким. При использовании этих мелкодисперсных ильменитовых концентратов непосредственно для плавки могут возникнуть некоторые проблемы, такие как загрязнение окружающей среды, снижение стабильности плавки и увеличение стоимости [68]. Следовательно, для использования мелкозернистой руды необходимо гранулирование [69].

Создание эффективных математических моделей и методов определения наилучших параметров необходимо в связи со сложностью промышленного оборудования и практическими трудностями проведения экспериментальных исследований в современных промышленных условиях. Поскольку это приведет к потере объемов производства и будет финансово невыгодным, промышленные испытания в производственных условиях немыслимы. Производство окатышей характеризуется рядом взаимосвязанных элементов, связанных с конструкцией окомкователя, технологией обслуживания и отсутствием большинства количественных зависимостей между различными параметрами процесса. Обнаружение этих зависимостей позволяет описать процесс получения сырых окатышей и составить уравнение работы гранулятора, позволяющее управлять фракционным составом получаемых окатышей. Математическое моделирование часто используется в металлургической практике, в том числе в процессе окомкования [70, 71]. Разработка математической модели, адекватной изучаемому процессу, дает возможность переходить к решению сложных задач и проверке полученных результатов экспериментальным путем.

Целью данной работы является построение математической модели процесса окомкования в виде системы дифференциальных уравнений и

обобщению полученных результатов экспериментально-статистическими методами.

## 2.1 Материалы и методы исследования

Шихта состоит из ильменитового концентрата, органического связующего вещества и углеродистого восстановителя. В качестве ильменитового концентрата используется железотитановые концентраты с низким содержанием примесей [71]. Ильменитовый концентрат по гранулометрическому составу относится к тонкозернистым. Измельченность концентрата составляет по крупности 95-98 % класса – 0,074 мм.

В качестве связующего при изготовлении сырых окатышей используется органическое связующее, например, сульфитно-спиртовая барда (ССБ) (рисунок 2.1) в количестве 3-3,3 % от массы шихты. В качестве углеродистого восстановителя используется антрацит с содержанием активного углерода не менее 85 % и серы не более 1 %. Химический состав ильменитового концентрата и компонентов шихты приведен в таблице 2.1, из которой видно, что содержание  $TiO_2$  составляет 50-55 %, а содержание железа сравнительно ниже, но содержание  $FeO$  достигает 32-36 %.

Таблица 2.1

Химический состав компонентов шихты

Наименование	Массовая доля, %							
	$TiO_2$	$FeO$	$Fe_2O_3$	$CaO$	$MgO$	$SiO_2$	$Al_2O_3$	$Cr_2O_3$
Ильменитовый концентрат	50-55	32-36	10-15	до 0,1	до 0,7	до 0,8	до 0,5	до 0,1
	$MnO$	$P_2O_5$	$V_2O_5$					
	до 0,6	до 0,05	до 0,3					
ССБ	C	S	H	O	$OCH_3$	OH		
	52	5,5	5	38	10	4		
Антрацит	C	$Fe_2O_3$	$Al_2O_3$	$SiO_2$	S	$H_2O$		
	87-90	1,5-2	до 1,5	3-3,5	1,2	1,5		



Рис. 2.1. Сульфитно-спиртовая барда (ССБ) в жидком состоянии

В современном производстве окатышей доступно несколько различных связующих материалов, но единой общепринятой классификации для них нет. Широко используется сульфитно-спиртовая барда (ССБ) – побочный продукт переработки древесины. С технической точки зрения, эти вязущие представляют собой лигносульфонаты, смешанные с восстановителями. Оптимальный расход связующего в шихту составляет 3,0-3,5 %. Лигносульфонатные вязущие вещества были испытаны в ходе исследования органических вязущих веществ [72] и в окатышах прямого восстановления [73]. Как отходы деревообработки лигносульфонаты могут быть относительно дешевыми. Окатыши, связанные сульфонатом лигнина, были более подвержены восстановлению, чем окатыши, связанные бентонитом. Лигносульфонаты по своей природе гидрофильны и помогают облегчить процесс окомкования в сложных условиях. Лигносульфонаты добавляют в шихту, чтобы уменьшить «липкость» поверхности окатышей и снизить скорость их роста [74]. Применение ССБ имеет недостатки, такие как повышенное поступление серы, в виде  $SO_x$  со связующими, что приводит к почти трехкратному увеличению содержания серы в окатышах, а также двукратному снижению прочности окатышей.

Для получения окатышей используется окомкователь барабанного типа ОБ-3,2х12,5 для ОКМ площадью 200-300 м<sup>2</sup> (рисунок 2.2).

Основными конструктивными элементами окомкователя являются цилиндрический барабан, два упорных ролика, четыре опорных ролика, привод,

узел увлажнения шихты, устройства загрузки и выгрузки шихты, система смазки. В цилиндрической части барабана находятся шесть вложенных друг в друга усеченных конусов под углом  $1-4^\circ$ , образующие зоны с фланцами. По кромке отверстия диаметром 1400 мм в торцевой стенке загрузочного торца барабана приварен отбойный конус, препятствующий высыпанию шихты из барабана.



Рис. 2.2. Окомкователь барабанного типа ОБ-3,2x12,5

Назначение барабанного окомкователя – равномерное смачивание и окомкование шихты с целью повышения ее зернистости и газопроницаемости. При 13-процентном наполнении барабана оптимальное время пребывания шихты составляет 2-3 минуты. С увеличением угла наклона барабана, длины и скорости вращения время окомкования шихты сокращается. Обычно используются барабаны со следующими характеристиками: диаметр 2,5-4,2 м, длина 6-12 м, угол наклона оси вращения внутрь  $10^\circ$ , скорость вращения 4-8 об/мин., уровень заполнения 10-20 % и 1-4 мин. времени перемешивания. В процессе окомкования влажность создается добавлением необходимого количества воды.

Установка конусной вставки в барабаны способствует и сегрегации материала. Каждый конус действует как тарельчатый окомкователь, что проявляется в характерном распределении материала (рисунок 2.3), принципиально меняет возможности создания рациональных условий работы барабана, так как позволяет, изменяя отдельные параметры, одновременно

оптимизировать другие. Так, увеличивая частоту вращения барабана или угол наклона, можно сохранить и даже увеличить время пребывания в нем шихты.



Рис. 2.3. Распределение материала в конусах барабанного окомкователя

В современных условиях для расчетов конструктивных размеров вставок, степени заполнения барабанов, массы и времени пребывания шихты в барабанах можно использовать адаптированные к промышленным условиям модельные исследования [75, 76].

## 2.2 Постановка задачи

На работу окомкователей влияют различные технологические факторы, которые необходимо знать, чтобы управлять процессом и обеспечивать получение сырых окатышей с заданными свойствами. На вход в барабан подается шихта – смесь ильменита  $FeO \cdot TiO_2$  и антрацита со связующим веществом – ССБ. На выходе получают окатыши-гранулы, диаметром 10-15 мм.

Технологическая схема получения сырых окатышей из ильменитового концентрата представлена на рисунке 2.4.



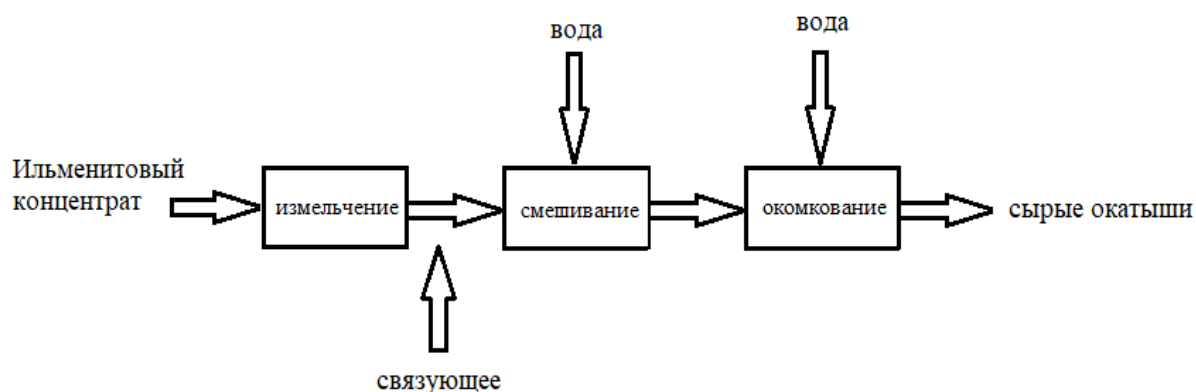


Рис. 2.4. Технологическая схема формирования сырых окатышей из ильменитового концентрата

Процесс формирования окатышей состоит из двух этапов: образования зародышей и накатывания шихты в барабанном окомкователе [77, 27].

Образование зародыша происходит следующим образом: капля ССБ попадает в слой шихты и, благодаря силам поверхностного натяжения, притягивает к себе частицы шихты. Концентраты ССБ как связующие материалы обладают превосходными адгезионными свойствами по отношению к материалам как органического, так и неорганического происхождения. Они хорошо смешиваются с любыми добавками, легко растворяются в воде в любой концентрации, не требуют особой подготовки, дешевы, недефицитны, безвредны для обслуживающего персонала и т.п. [78]. Образуются переувлажненные комки, обладающие высокой пластичностью.

Частицы шихты в зародыше окружены жидкостью и обладают относительной свободой перемещения, благодаря чему облегчается процесс уплотнения окатыша. Зародыши достаточно прочны и могут выдерживать динамические нагрузки в окомкователе, не повреждаясь, поскольку они удерживаются вместе молекулярными силами притяжения.

В результате многократных ударов по неподвижному слою материала при движении в окомкователе происходит второй этап образования окатышей – их рост. Зародыши уплотняются под действием динамических напряжений, точнее, взаимное движение отдельных частиц приводит к их более плотной укладке. В этом случае на поверхность зародыша выдавливается избыточная влага, что позволяет прикреплять новые частицы. Минимальная толщина жидких пленок

внутри окатышей при таком режиме работы гранулятора соответствует величине динамических нагрузок. Когда достигается этот предел, окатыш перестанет расширяться, и выделение жидкости на его поверхность прекратиться [47].

Равномерно распределенная влага и связующее вещество в процессе подачи имеет решающее значение для улучшения характеристик окатышей, особенно для предотвращения образования нежелательных агломератов перед образованием гранул [79].

Сцепление частиц друг с другом в окатыше осуществляется за счет двух видов сил: молекулярных и капиллярных.

Молекулярные силы сцепления между частицами в окатыше обусловлены взаимным влиянием между поверхностями и молекулярными связями. Капиллярные силы возникают на поверхности прослоек жидкости кольцевой формы, образующихся в точках контактов влажных твердых частиц комкуемого материала. При этом поверхность жидкости получается вогнутой, ее стремление выровнять свою поверхность создает отрицательное капиллярное давление, стягивающее частицы [80].

Задача математического описания объекта состоит в построении дифференциального оператора, переводящего начальную точку в конечную по заданной траектории. Так как окомкователь барабанного типа является объектом с распределенными параметрами, то модель представляет собой систему дифференциальных уравнений в частных производных.

В работе приняты следующие допущения: шихта однородна по гранулометрическому и химическому составу; не происходит слипания и разрушения окатышей, налипания их на стенки барабана; окатыши имеют правильную форму; уплотнение окатышей происходит равномерно; в каждой зоне содержится постоянное количество материала. В модели выделяются две фазы – фаза шихты и фаза окатышей; масса и размеры капли ССБ неизменны.

### 2.3 Моделирование процесса формирования окатышей в барабанном окомкователе

Окомкование шихты характеризуется определенными параметрами и условиями процесса, которые могут быть выражены в виде функции  $F$ , имеющей вид:

$$F = f(m, n, m^{\text{ССБ}}, R, \mu, g) = 0$$

где  $m$  – масса окатышей, кг;  $n$  – количество окатышей;  $m^{\text{ССБ}}$  – масса ССБ (органическое связующее вещество), кг;  $R$  – приращение радиуса окатыша за счет ССБ и шихты;  $\mu$  – расход ССБ и шихты, накатанный на окатыш;  $g$  – масса переноса материала в зонах окомкователя.

При моделировании окомкования для каждой зоны барабанного окомкователя рассчитывают следующие характеристики шихты: распределения массового и количественного гранулометрических составов от времени; количество комков каждого диаметра и их общее количество; приращение радиуса частиц и гранул шихты за счет накатывания шихты; расход шихты и возвращаемого материала.

Математическая модель составлена для одной зоны окомкователя, уравнения для всех зон аналогичны.

Дифференциальные уравнения составляются относительно функций вида:

$$m_i^*(t, r) = \lim_{\Delta r \rightarrow 0} m_i(t, c, r + \Delta r) / \Delta r \quad (2.1)$$

$m_i^*(t, r)$  – приведенная масса окатышей в  $i$ -ой зоне, кг/м;

$m_i(t, r, r + \Delta r)$  – масса окатышей радиуса  $r$   $i$ -ой зоны, имеющих в момент времени  $t$  радиус от  $r$  до  $r + \Delta r$ , кг;

$$n_i^*(t, r) = \lim_{\Delta r \rightarrow 0} n_i(t, c, r + \Delta r) / \Delta r \quad (2.2)$$

$n_i^*(t, r)$  – приведенное количество окатышей радиуса  $r$  в  $i$ -ой зоне,  $\text{м}^{-1}$ ;

$n_i(t, r, r + \Delta r)$  – количество окатышей  $i$ -ой зоны радиуса  $[r, r + \Delta r]$  в момент времени  $t$ , шт.;

$$m_i^{\text{ССБ}*}(t, r) = \lim_{\Delta r \rightarrow 0} m_i^{\text{ССБ}}(t, c, r + \Delta r) / \Delta r \quad (2.3)$$

$m_i^{*CCB}(t, r)$  – приведенная масса ССБ в  $i$ -ой зоне, кг/м;

$m_i^{CCB}(t, r, r + \Delta r)$  – масса ССБ в окатышах  $i$ -ой зоны, имеющих в момент времени  $t$  радиус от  $r$  до  $r + \Delta r$ , кг;

Дифференциальное уравнение изменения приведенной массы окатышей выглядит следующим образом:

$$\frac{\partial m_i^*(t, r)}{\partial t} + (R_1 + R_2) \frac{\partial m_i^*(t, r)}{\partial r} = g_{\text{ВЫХ}} \left( \frac{m_{i-1}^*(t, r)}{M_{i-1}^{\text{общ}}} - \frac{m_i^*(t, r)}{M_i^{\text{общ}}} \right) + (\mu_1^{CCB} - \mu^{\text{ш}}) \cdot n_i^*(t, r) \quad (2.4)$$

Для  $i = 1$  и  $r > R_{10}$   $m_{i-1}^*(t, r) = 0$ , если  $r \leq R_{10}$ , то  $m_{i-1}^*(t, r) = m_6^*(t, r)$ ,

где  $R_{10}$  – максимальный размер окатышей, возвращаемых для повторного окомкования, м;  $g_{\text{ВЫХ}}$  – масса переноса материала из одной зоны в другую, кг/с;  $M_i^{\text{общ}}$  – масса материала в  $i$ -ой зоне, кг;  $\mu_1^{CCB}$  – расход ССБ на один окатыш радиуса  $r$ , кг/с;  $\mu^{\text{ш}}$  – масса шихты, накатанной на окатыш радиуса  $r$ , кг/с;  $R_1$  – приращение радиуса окатыша за счет расхода ССБ, м;  $R_2$  – приращение радиуса окатыша за счет накатанной шихты, м.

Уравнение изменения приведенного количества окатышей

$$\frac{\partial n_i^*(t, r)}{\partial t} + (R_1 + R_2) \frac{\partial n_i^*(t, r)}{\partial r} = g_{\text{ВЫХ}} \left[ \frac{n_{i-1}^*(t, r)}{M_{i-1}^{\text{общ}}} - \frac{n_i^*(t, r)}{M_i^{\text{общ}}} \right] \quad (2.5)$$

При  $i = 1$  и  $r < R_{10}$   $n_i^*(t, r) = 0$ , если  $r \leq R_{10}$ , то  $n_{i-1}^*(t, r) = n_6^*(t, r)$ .

Уравнение изменения приведенной массы ССБ в окатышах

$$\frac{\partial m_i^{*CCB}(t, r)}{\partial t} + (R_1 + R_2) \frac{\partial m_i^{*CCB}(t, r)}{\partial r} = \mu_i^{CCB} \cdot m_i(t, r) + g_{\text{ВЫХ}} \cdot m_{\text{к}} \left( \frac{n_{i-1}^*(t, r)}{M_{i-1}^{\text{общ}}} - \frac{n_i^*(t, r)}{M_i^{\text{общ}}} \right), \quad (2.6)$$

$m_{\text{к}}$  – масса капли ССБ, кг.

Уравнение изменения массы шихты

$$\frac{dm_i^{\text{ш}}(t)}{dt} = g_{\text{ВЫХ}} \left( \frac{m_{i-1}^{\text{ш}}(t)}{M_{i-1}^{\text{общ}}} - \frac{m_i^{\text{ш}}(t)}{M_i^{\text{общ}}} \right) - \mu_0, \quad (2.7)$$

$m_i^{\text{ш}}(t)$  – масса шихты в  $i$ -ой зоне в момент времени  $t$ , кг;

$$\mu_0 = \int_{R_0}^{R_{\text{max}}} \mu^{\text{ш}} \cdot n_i^*(t, r) dr, \quad (2.8)$$

где  $R_0$  и  $R_{\text{max}}$  – соответственно минимальный и максимальный радиус окатышей, м.

Масса материала в зоне

$$\mu_i^{\text{ССБ}} = \frac{m_i^*(t,r)}{n_i^*(t,r) \cdot M_i^{\text{общ}}} \cdot g_i^{\text{ССБ}} \quad (2.9)$$

Расход ССБ на один окатыш радиуса  $r$

$$\mu_i^{\text{общ}} = m_i^{\text{ш}}(t) + \int_{R_0}^{R_{\text{max}}} m_i^*(t,r) dr \quad (2.10)$$

$g_i^{\text{ССБ}}$  – расход ССБ, кг/с;  $\mu_i^{\text{ССБ}}=0$  при  $i = 4,5,6$ .

Приращение радиуса окатыша за счет расхода ССБ

$$R_1 = \sqrt[3]{\frac{3\mu_i^{\text{ССБ}} \cdot t}{4\pi\rho_{\text{ССБ}}} + r^3} - r \quad t = 1c \quad (2.11)$$

Приращение радиуса окатыша за счет накатывания шихты

$$R_2 = \sqrt[3]{\frac{100}{\varepsilon} \left( \frac{3\mu_i^{\text{ССБ}}}{4\pi\rho_{\text{ССБ}}} + r^3 \right) + \left( \frac{100}{\varepsilon} - 1 \right) (r - R_y)} - r \quad (2.12)$$

при  $t = 1c$ .

$\rho_{\text{ССБ}}$  – плотность ССБ, кг/м<sup>3</sup>;  $\varepsilon$  – пористость шихты;  $R_y$  – уменьшение радиуса окатыша за счет уплотнения, м.

Масса шихты, накатанной на один окатыш

$$\mu^{\text{ш}} = \frac{400\pi\rho_{\text{ш}}}{3\varepsilon} \left[ \frac{3\mu_i^{\text{ССБ}} \cdot t}{4\pi\rho_{\text{ССБ}}} + r^3 - (r - R_y)^3 \right], \quad (2.13)$$

при  $t = 1c$ .

$\rho_{\text{ш}}$  – плотность шихты, кг/м<sup>3</sup>.

Масса переноса материала из зоны в зону

$$g_{\text{вых}} = G_{\text{загр}} + G_{\text{возвр}} \quad (2.14)$$

$G_{\text{загр}}$  – расход шихты, кг/с;  $G_{\text{возвр}}$  – расход возвращаемого материала, кг/с.

## 2.4 Обсуждение результатов

Представлена система дифференциальных уравнений в частных производных, описывающая взаимодействие твердых компонентов шихты с ССБ, в результате чего при перемещении этих компонентов в барабанном окомкователе формируются окатыши. Результаты моделирования позволяют сделать вывод о том, что качество получаемых окатышей при прочих равных условиях (гранулометрический состав шихты, её температура, высота слоя шихты) зависит

от соотношения расходов шихта – ССБ. ССБ оказывает важное влияние на формирование окатышей. Она может привести к повышению вязкости поверхности, что позволит улучшить качество окатышей. Также она способствует поддержанию правильного баланса между молекулярными силами и силами внешней поверхности, что помогает сохранить правильную форму окатышей. Также она позволяет избежать предварительного плавления частиц при высоких температурах. При недостатке ССБ мелкие частицы шихты заполняют поры, что приводит к снижению газопроницаемости слоя шихты. При избытке ССБ жидкая фаза заполняет поры, что также приводит к снижению газопроницаемости. В обоих случаях снижётся качество получаемых окатышей, вследствие неполного их обжига и увеличения оборота [81].

## 2.5 Выводы по второй главе

1. Получены математические модели процесса формирования окатышей из титаномагнетитового концентрата при взаимодействии в шихту вяжущего органического компонента, на примере ССБ.
2. Получены уравнения, описывающие массу и количество окатышей, которые имеют определенную геометрическую характеристику  $i$ -ой зоны окомкователя в зависимости от момента времени.
3. Получены уравнения изменения массы ССБ в окатышах, в результате чего можно определить расход шихты и переноса массы шихты из зоны в зону.
4. Результаты математических расчетов данного процесса позволяют исследовать дальнейшую термическую обработку сырых окатышей по зонам обжиговой машины с учетом газодинамических параметров шихты.

### **3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ ТИТАНОВЫХ ОКАТЫШЕЙ**

В целях оптимизации технологического режима рассмотрена задача математического моделирования процесса сушки титановых окатышей. Построен математический оператор, переводящий начальную изображающую точку в пространстве параметров в конечную вдоль заданной траектории. Исследованы основные закономерности процесса сушки титановых окатышей и определены условия, позволяющие получить минимальное содержание влаги в продукте за промежуток времени, определенный техническим заданием, без дополнительного расхода электроэнергии.

#### **3.1 Описание математической модели процесса сушки титановых окатышей**

Математическое моделирование процесса сушки титановых окатышей – это процесс исследования и прогнозирования изменений в химическом и механическом состоянии титановых окатышей в процессе их сушки. Для этого используются математические модели, которые позволяют предсказать изменения в химическом и механическом состоянии титановых окатышей при изменении температуры, влажности и других факторов. Это позволяет изучать химические и механические изменения в материале при сушке и получать достоверную информацию о процессе сушки титановых окатышей.

Сушка окатышей осуществляется на обжиговой конвейерной машине (ОКМ), которая является наиболее значимым с точки зрения сохранения целостности, как отдельных окатышей, так и структуры слоя в целом. Разрушение окатышей и образование трещин связано с неправильной организацией работы зоны сушки и оказывает влияние на качество обожженных окатышей, расход энергоносителей и производительность машины [82]. Процессы термообработки в ОКМ осуществляется за счет использования тепла от сжигания природного газа.

На рисунке 3.1 изображена схема движения газа в ОКМ. В современных машинах предусмотрены зоны сушки, нагрева, обжига, рекуперации и охлаждения. Окатыши последовательно проходят через каждую зону. Обжиговая машина состоит из системы взаимосвязанных между собой газоходов с перепускными коллекторами, предназначенных для перемещения воздуха и продуктов сгорания между зонами. Именно обжиговая зона непосредственно нагревает теплоноситель теплом сгорания природного газа; в остальных зонах используются вторичные источники тепла для удовлетворения потребностей техпроцесса. Такими источниками тепла являются продукты сгорания и теплый воздух в зонах сушки и нагрева, а в зонах охлаждения охлаждающий слой окатышей. Таким образом, использование вторичных источников позволяет увеличить температуру слоя окатышей и воздуха на входе зоны обжига, что способствует снижению затрат природного газа [83].

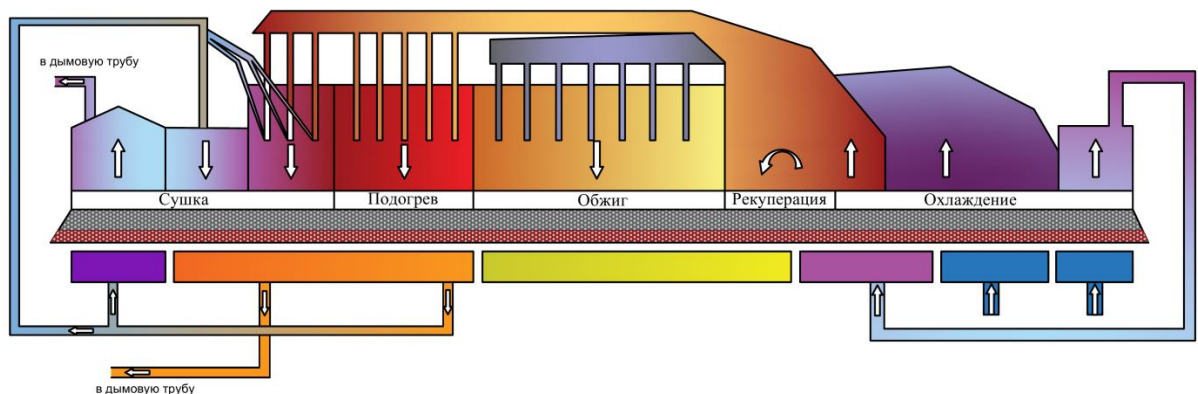


Рис. 3.1. Схема движения газа в ОКМ-1-592М

Математическое моделирование процесса сушки титановых окатышей может быть выполнено с использованием различных методов. Наиболее часто используемым методом является использование дифференциальных уравнений для описания процесса сушки. Это включает в себя решение системы уравнений, которые описывают движение влаги в окатышах, скорость теплопередачи и скорость испарения. Другие методы моделирования процесса сушки включают моделирование методом Монте-Карло, анализ методом конечных элементов и численные методы.



Качество высушенных окатышей сильно повлияет на дальнейшие стадии спекания, и поэтому важно, чтобы окатыши были высушены как можно эффективнее без повреждений. Таким образом, решающее значение для сушки имеет то, что влага внутри окатышей может выходить через капилляры, не повреждая структуру.

Перед поступлением в зону сушки ОКМ сырые окатыши со средним размером около 12-13 мм [84] загружаются на колосниковую решетку и укладываются на верхний слой уже обожженных окатышей, который защищает колосниковые решетки и сырые окатыши от чрезмерного нагрева. Затем теплый воздух подается через слой сначала снизу (сушка на восходящей тяге), а затем сверху (сушка на нисходящей тяге) в зону сушки. Причина использования двух типов направлений сушки заключается в том, чтобы сначала сделать нижние слои более устойчивыми к давлению при сушке на восходящей тяге. Следовательно, горячий воздух, подаваемый снизу, быстро высушит нижнюю часть слоя, но воздух вскоре охладится от температуры на входе до температуры точки росы, что может привести к образованию конденсата в верхней части слоя. Сырые окатыши ослабевают при конденсации воды, и это одна из причин, по которой существует ограничение по высоте слоя. Другим ограничением является то, что подаваемое тепло должно регулироваться таким образом, чтобы влага, имеющаяся в порах, могла выходить через капилляры без какого-либо избыточного давления, которое ослабило бы структуру окатышей. Это явление, при котором возникает избыточное давление, называется сушкой под давлением и является одним из самых больших ограничений температуры поступающего воздуха. Еще одной причиной поддержания достаточно низкой температуры является риск раннего окисления. Температура поступающего воздуха обычно составляет около 400 °С в ОКМ с прямой решеткой, в то время как температура слоя первоначально составляет приблизительно 20-25 °С.

Сушка окатышей обычно делится на три стадии [33]. Первый этап – это период сушки с постоянной скоростью. Здесь происходит перенос воды за счет капиллярных сил. Этот период продолжается до тех пор, пока влага внутри

окатышей больше не будет выводиться на поверхность с той же скоростью, с которой происходит испарение. На следующем этапе, в период снижения скорости, влага перемещается главным образом за счет диффузии, и фронт влаги перемещается к сердцевине окатыша. В третьем периоде испаряется гигроскопичная и химически связанная вода. Утверждалось, что первые два периода будут совмещаться [85, 63]. Таким образом, следует изучить перенос тепла и влаги как между окатышами, так и через один окатыш, и поэтому необходимо выполнить следующие действия:

- Модели распределения скорости и температуры
- Модели распределения влаги и тепла
- Исследование граничных условий уравнения.

### 3.2 Основные уравнения теплообмена в слое и сушки окатышей

Тепловой поток, который направляется в слой окатышей, приведен на рисунке 3.2.

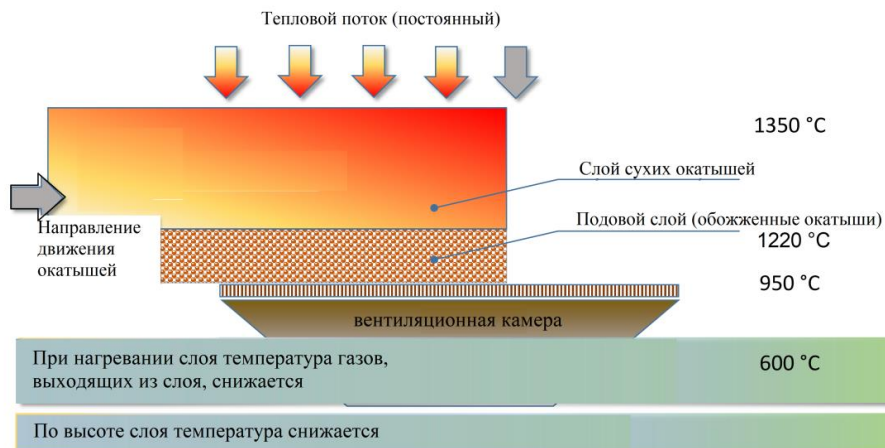


Рис. 3.2. Принцип теплообмена с перекрестным потоком

Тепловой баланс материала слоя:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (c_m \cdot p_m \cdot t) = \frac{\alpha_v}{m} \cdot (T - t) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_{\text{слой}} \cdot \frac{\partial t}{\partial y} \right) + Q_m \quad (3.1)$$

Тепловой баланс газовой среды, проходящей через слой:

$$-W_{\Gamma} \cdot c_{\Gamma} \cdot \rho_{\Gamma} \cdot \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\alpha_v}{m} \cdot (T - t) - Q_{\Gamma} \quad (3.2)$$

где  $t$  – время;  $\alpha_v$  – объемный коэффициент теплообмена в слое;  $m$  – коэффициент массы окатышей;  $\lambda_{\text{слой}}$  – коэффициент теплопроводности слоя (с учетом эмиссии);  $W_g$  – скорость потока газа в слое;  $c_g$  – теплоемкость газа;  $\rho_g$  – плотность газа; кг/м<sup>3</sup>;  $y$  – координата в пределах высоты слоя; (все размеры даны в системе СИ),  $Q_m$  – алгебраическая сумма всех источников тепла;  $Q_r$  – общее тепло, выделяемое газом.

Вспомогательные соотношения:

$$m = 1 + \frac{\alpha_F \cdot R}{5 \cdot \lambda_m} \quad (3.3)$$

$$\alpha_v = \alpha_F \cdot \frac{3 \cdot (1-E)}{R} \quad (3.4)$$

$$\alpha_F = \alpha_F(T, W_a, R) \quad (3.5)$$

где  $\alpha_F$  – поверхностный коэффициент теплообмена в слое;  $f$  – удельная поверхность материала в слое;  $E$  – пористость слоя окатышей;  $R$  – радиус сферического окатыша;  $\lambda_m$  – коэффициент теплопроводности материала окатышей.

Материальный баланс движения влаги при испарении (конденсации) в термически тонких окатышах:

$$-\rho_{\text{сух.мат.}} \cdot \frac{\partial b}{\partial \tau} = \rho_g \cdot W_g \cdot \frac{\partial X}{\partial y} \quad (3.6)$$

механизм испарения влаги

$$\rho_g \cdot W_g \cdot \frac{\partial X}{\partial y} = f \cdot g_m \left( \frac{X_{\text{нас}} - X}{1+X} \right) \quad (3.7)$$

$b$  – влажность окатышей (по сухой массе);  $X$  – массовое содержание влаги в газе;  $g_m$  – коэффициент массообмена при испарении влаги;  $X_{\text{нас}}$  – влажность газа при насыщении.

в зависимости от знака убывания  $(X_{\text{нас}} - X)$   $\left\{ \begin{array}{l} \text{Происходит испарение } \frac{\partial b}{\partial \tau} < 0, \text{ потеря тепла} \\ \text{Конденсация } \frac{\partial b}{\partial \tau} > 0, \text{ потребляемое тепло} \end{array} \right.$

*Дополнительные уравнения*

Модель десульфурации окатышей:

$$\frac{\partial \psi_s}{\partial \tau} = \frac{\partial \varphi_s}{\partial \tau} - \frac{\partial \varphi_c}{\partial \tau} + \frac{\partial \varphi'_c}{\partial \tau} \quad (3.8)$$

где  $\psi_s$  – доля серы, выделяющаяся в газовой фазе;  $\varphi_s$  – фракция окисления пирита или пирротина;  $\varphi_c, \varphi'_c$  – доли образования и разложения сульфата кальция для офлюсованных окатышей.

Каждое слагаемое баланса серы рассматривается как комплексная функция температуры и основности – для офлюсованных окатышей. Эти функции готовятся путем соответствующей обработки экспериментальных данных, полученных в лабораторных и промышленных условиях.

Как известно, прочность окатышей должна увеличиваться во времени при любой постоянной температуре по показателю степени:

$$\frac{\sigma(t,\tau)-\sigma_0}{\sigma_{max}(t)-\sigma_0} = 1 - \exp(-k(t) \cdot \tau) \quad (3.9)$$

$\sigma_0$  – прочность окатышей в начале спекания,  $\sigma_{max}$  – максимальная прочность при этой температуре, достигнутая в испытаниях с длительной выдержкой [86].

### 3.3 Описание процесса проведения исследований и получения результатов

Проблема рационального использования топливно-энергетических ресурсов наиболее важна для энергоемких промышленных производств. Оптимизация режимов сушки движущейся плотной многослойной массы титановых окатышей в обжиговом агрегате позволит повысить энергоресурсоэффективность агрегата в результате интенсификации и оптимизации тепло-массообменных процессов по минимуму себестоимости затрачиваемой тепловой энергии.

Решением этой задачи является повышение энергоресурсоэффективности процесса сушки титановых окатышей в агрегате туннельного типа с использованием математической и компьютерной модели процедуры оптимизации. При этом использовали дискретное динамическое программирование и процедуру контроля эффекта перераспределения влаги по высоте многослойной засыпки окатышей. Это позволяет предотвращать появление горизонтов переувлажнения, негативно влияющих на газопроницаемость многослойной массы окатышей, что приводит к

необоснованному росту энергопотребления и снижению производительности агрегата в целом.

Сырые окатыши, поступающие в обжиговые агрегаты, представляют собой образцы шарообразной формы различного диаметра. По силе сцепления и плотности они эквивалентны брикетам, полученным при давлении прессования 50-100 МПа. Обжиг окатышей следует вести таким образом, чтобы, с одной стороны, не нарушать их однородность [71], а с другой – не замедлять процесс, не снижать производительность установок. В процессе сушки возможны два вида разрушения: трещинообразование на поверхности окатышей и высокотемпературное взрывообразное разрушение с образованием мелочи. Механические свойства зависят от температуры и длительности обжига, скоростей нагрева и охлаждения. Изменение этих показателей связано с химическим и минералогическим составом окатышей и определяет их механические и металлургические свойства без снижения ценности. Одно из свойств окатышей – термостойкость, т. е. способность нагреваться без разрушения и образования трещин при максимальной скорости подвода тепла. В это понятие также входят трещинообразование и температурный шок [71]. Разрушение, определяемое развитием объемно-напряженного состояния выше предельного, зависит от величины возникающих при сушке градиентов влагосодержания и температуры. Конечная температура термообработки оказывает существенное влияние на механическую прочность окатышей [75]. Начало процесса сушки, характеризующееся удалением капиллярной воды, особенно опасно в плане трещинообразования, потому что связность материала до соприкосновения оболочек адсорбционной воды обеспечивается главным образом капиллярными силами, которые сравнительно невелики, а интенсивность удаления влаги в этот период является максимальной [87]. В промышленных условиях в начальный период сушки разупрочнение проявляется в виде трещин, образующихся в окатышах средних и нижних слоев (при движении газатеплоносителя сверху вниз). Трещины представляют собой локальные разрушения глубиной до 2 мм разной длины, что резко снижает прочность

готовых окатышей [88, 89]. В начале сушки сырых продуктов на их поверхности могут возникать трещины. Причиной этого является превышение скорости парообразования над скоростью удаления пара через поры окатышей. Далее при более быстром подъеме температуры, когда скорость образования пара в их объеме возрастает, а скорость его удаления через поры остается прежней, может наблюдаться растрескивание взрывоподобным разрушением (температурный шок) [75]. Очевидно, если возникающие напряжения превысят предельные, то произойдет разрушение окатыша при сушке. Если же нормальные напряжения превысят допустимые, то это приведет к внезапному разрушению его шаровой оболочки, т. е. к так называемому шоку. Для предупреждения появления трещин или полного разрушения окатыша под действием выделяющегося внутри него водяного пара сушка должна быть достаточно медленной. При жестких режимах сушки производственные потери могут достигать 7 %. На разрушение окатышей при термическом воздействии оказывает влияние ряд технологических факторов [80, 90-94]. Устойчивость к трещинообразованию и шоку определяется влажностью шихты. У окатышей с низкой влажностью температура шока значительно выше. В процессе слоевой сушки на конвейерной машине происходит перераспределение воды по высоте, в результате которого в отдельных участках наблюдается переувлажнение [95]. При этом ослабляется прочность взаимосвязи частиц, «размываются» контакты, уменьшается прочность структуры окатышей. Переувлажнение имеет место лишь в начале сушки.

Решение задачи достижения наилучших показателей процесса возможно на основе применения математической модели в целях оптимизации технологического режима. Для этого необходимо построить математический оператор, переводящий начальную изображающую точку в пространстве параметров в конечную вдоль заданной траектории.

### **3.4 Постановка задачи моделирования**

Сушка окатышей представляет собой термический процесс удаления из

твердых материалов содержащейся в них влаги за счет ее испарения. Первыми испаряются молекулы, скорость движения которых больше некоторой средней. При выходе в пар наиболее быстрых молекул жидкости средняя скорость оставшихся уменьшается, следовательно, снижаются и их средняя кинетическая энергия, и запас внутренней энергии испаряющейся жидкости [95].

Механизм процесса сушки нагретым газом представим следующим образом. При соприкосновении входящего материала с горячим сушильным агентом влага, находящаяся на поверхности, испаряется и диффундирует в молекулярном виде в окружающую среду. Между внутренними слоями продукта и его поверхностью создается перепад концентрации влаги, в свою очередь, вызывающий движение воды к поверхностным слоям (внутреннюю диффузию). Вследствие этого процесса испарение происходит не только с поверхности, но и из глубин пор материала. Это явление затруднено капиллярным эффектом.

Анализируя процесс сушки нагретым газом, можно установить, что его скорость зависит от физических свойств, размеров и формы материала, начальной влажности, параметров агрегата сушки (температуры, влажности, скорости движения продукта), а также условий обтекания материала. При большей скорости сушки в материале, дающем усадку, возникают большие напряжения, которые при определенных условиях могут вызвать появление трещин, что ухудшает качество материала [96].

Газы с температурой, превышающей 400 °С, с помощью центробежных вентиляторов подают снизу вверх под металлическую транспортерную ленту, на поверхности которой перемещается слой титановых окатышей толщиной 190 мм. Материал с начальной влажностью до 10 % после окомкования загружают в сушильный агрегат при начальной температуре 20 °С. Попадая на ленту, мелкие окатыши проваливаются на поддон с гребковым механизмом в виде шнека. Оставшийся материал прогревают газом-носителем руднотермической печи [92-94, 97-105] в ходе его продвижения на металлической ленте.

Для упрощения решения задачи в работе введены условные обозначения, представленные в таблице 3.1.

Условные обозначения при решении вопросов моделирования процесса сушки

Показатели	Обозначение	Размерность
плотность материала	$\rho$	кг/м <sup>3</sup>
масса окатыша	$m_{ок}$	кг
скорость движения окатышей на ленте	$V$	м/с
объем испарившейся влаги из окатышей с единичного отрезка в единицу времени	$g_{п}$	м <sup>3</sup>
скорость движения окатышей на ленте	$V_1$	м/с
скорость движения газа	$V_2$	м/с
давление влаги в газе	$\rho_{H_2O}^r$	мм. рт. ст.
масса влаги в газе	$m_{H_2O}$	кг
молекулярная масса воды	$\mu_{H_2O}$	кг
температура газа	$T_r$	К
объем газа	$V_r$	м <sup>3</sup>
газовая постоянная	$R$	Дж/кмоль
площадь сечения, занимаемая газом	$S$	м <sup>2</sup>
площадь испарения	$S$	м <sup>2</sup>
число окатышей	$N_{ок}$	шт.
приведенное количество окатышей на площади $S$	$N_{пр}$	кг/м <sup>3</sup>
плотность окатыша	$\rho_{ок}$	кг/м <sup>3</sup>
средний радиус окатыша	$R$	м
длина дуги, занимаемая газом	$\alpha$	м
температура окатыша	$T_1, T_2$	К

### 3.5 Моделирование процесса сушки титановых окатышей

При моделировании процесса принимаем следующие допущения:

- рассматриваем две фазы: газовую и твердую;
- загрузка окатышей непрерывна;
- геометрические размеры зон, удельная теплоемкость и коэффициент парообразования постоянны во всем диапазоне рассматриваемых температур;
- сушку рассматриваем как объект с распределенными параметрами.



При построении модели введем функцию линейной плотности материала  $P_1(t, x)$  на отрезке  $[x, x + \Delta x]$  ленты:

$$P_1(t, x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{m_{\text{ок}}(t, x, x + \Delta x)}{\Delta x}, \quad (3.10)$$

здесь  $x$  – длина ленты до рассматриваемого отрезка, м.

Найдем изменение массы окатыша за время  $\Delta t$  на промежутке  $\Delta x$ :

$$m_{\text{ок}}(t, x, x + \Delta x) = m_{\text{ок}}(t, x - V\Delta t, x) - g_{\text{п}}\Delta t\Delta x, \quad (3.11)$$

где  $V$  – скорость движения окатышей на ленте, м/с;  $g_{\text{п}}$  – объем испарившейся влаги из окатышей с единичного отрезка в единицу времени.

Разделим равенство (3.11) на  $\Delta x$  и перейдем к пределу при  $\Delta x \rightarrow 0$ :

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{m_{\text{ок}}(t, x, x + \Delta x)}{\Delta x} = \frac{\lim_{\Delta x \rightarrow 0} m_{\text{ок}}(t, x - V\Delta t, x) - g_{\text{п}}\Delta t}{\Delta x} - g_{\text{п}}\Delta t \quad (3.12)$$

Имеем

$$P_1(t + \Delta t, x) = P_1(t, x - c\Delta t) - g_{\text{п}}\Delta t \quad (3.13)$$

Прибавим  $-P_1(t, x)$  к двум частям равенства (3.13):

$$P_1(t + \Delta t, x) - P_1(t, x) = P_1(t, x - V\Delta t) - P_1(t, x) - g_{\text{п}}\Delta t \quad (3.14)$$

Разделим уравнение (3.14) на  $\Delta t$ , перейдем к пределу при  $\Delta t \rightarrow 0$ . Умножим и разделим числитель и знаменатель на  $V$ :

$$\frac{\partial P_1(t, x)}{\partial x} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{-V(P_1(t, x - V\Delta t) - P_1(t, x))}{-V\Delta t} - g_{\text{п}} \quad (3.15)$$

Обозначим  $-V\Delta t = \Delta x$

Получим

$$\Delta x = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{-V(P_1(t, x - V\Delta t) - P_1(t, x))}{\Delta x} - g_{\text{п}} \quad \text{или} \quad \frac{\partial P_1(t, x)}{\partial t} = -V \frac{\partial P_1(t, x)}{\partial x} - g_{\text{п}} \quad (3.16)$$

Этот принцип построения математической модели сушки титановых окатышей будем использовать при синтезе остальных уравнений модели.

### 3.5.1 Уравнения, описывающие зону окатыша

Изменение массы окатыша:

$$\frac{\partial P_1(t,x)}{\partial t} + V_1 \frac{\partial P_1(t,x)}{\partial x} = g_1 \quad (3.17)$$

Граничные условия уравнения (3.17):

$$P_1(t, 0) = \frac{G_{ок}(t)}{V_1(t)} \quad (3.18)$$

Изменение объема воды в окатыше:

$$\frac{\partial P_2(t,x)}{\partial t} + V_1 \frac{\partial P_1(t,x)}{\partial x} = -g_1 \quad (3.19)$$

Граничное условие уравнения (3.19):

$$P_2(t, 0) = \frac{G_{ок}(t)[H_2O]}{V_1(t)} \quad (3.20)$$

Уравнение изменения количества тепла в окатышах:

$$\frac{\partial Q_1}{\partial t} + V_1 \frac{\partial Q_1(t,x)}{\partial x} = -(T_1 C_{H_2O} + \alpha_{H_2O})g_1 + g_2 \quad (3.21)$$

Граничное условие уравнения (3.21):

$$Q_1(t, 0) = C_{H_2O} G_{ок}(t) T_{вх} \quad (3.22)$$

Уравнение изменения количества газа:

$$\frac{\partial P_3^i(t,x)}{\partial t} - V_2 \frac{\partial P_3^i(t,x)}{\partial x} = q_1, i = 1, n, \quad (3.23)$$

где  $n = 9$  – число зон.

Граничное условие уравнения (3.23):

$$P_3^i(t, x_i) = \frac{G_n^i(t)}{V_2(t)} + P_3^{i+1}(t, x_i) \quad (3.24)$$

Уравнение изменения объема влаги в газе:

$$\frac{\partial P_4^i(t,x)}{\partial t} - V_2 \frac{\partial P_4^i(t,x)}{\partial x} = q_1, i = 1, n \quad (3.25)$$

Граничное условие уравнения (3.25):

$$P_4^i(t, x_i) = \frac{G_r^i(t)[H_2O]^{mac}}{V_2(t)} + P_4^{i+1}(t, x_i) \quad (3.26)$$

Уравнение изменения количества тепла в газе:

$$\frac{\partial Q_2^i(t,x)}{\partial t} + V_2 \frac{\partial Q_2^i(t,x)}{\partial x} = (T_1 C_{H_2O} + \alpha_{H_2O})g_1 - g_2 - g_3, i = 1, n \quad (3.27)$$

здесь  $V_1$  – скорость движения окатышей на ленте, м/с;  $V_2$  – скорость движения газа, м/с.

Граничное условие уравнения (3.27):

$$Q_2^i(t, x) = C_2 T_2^{\text{вх}} G_T(t) + Q_2^{i+1}(t, x_i) \quad (3.28)$$

### Расчет правых частей

Используя уравнение Менделеева – Клайперона, найдем скорость газа:

$$P_{H_2O}^\Gamma = \frac{m_{H_2O} RT_\Gamma}{\mu_{H_2O} V_\Gamma}, \quad (3.29)$$

где  $\rho_{H_2O}^\Gamma$  – давление влаги в газе, мм. рт. ст.;  $m_{H_2O}$  – масса влаги в газе, кг;  
 $\mu_{H_2O}$  – молекулярная масса воды, кг;  $T_\Gamma$  – температура газа, К;  $V_\Gamma$  – объем газа, м<sup>3</sup>;  
 $R$  – газовая постоянная, Дж/кмоль.

Разделим уравнение (3.29) на  $\Delta x$ :

$$P_{H_2O}^\Gamma = \frac{m_{H_2O}}{\Delta x} \frac{RT_\Gamma}{\mu_{H_2O}} \frac{1}{V_\Gamma/\Delta x} \quad (3.30)$$

здесь  $V_\Gamma/\Delta x = S$ ,  $m_{H_2O}/\Delta x = P_\Gamma$  и  $P_{H_2O}^\Gamma = P_\Gamma^i RT_\Gamma/\mu_{H_2O} S$ ,

где  $S$  – площадь сечения, занимаемая газом, м<sup>2</sup>.

Скорость газа определяем по общей формуле

$$V_\Gamma = \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_{H_2O}^{\Gamma(i)} - P_{H_2O}^{\Gamma(i+1)})} \quad (3.31)$$

Подставив уравнение (3.30) в (3.31), получим

$$V_\Gamma = \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_4^i T_\Gamma^i - P_4^{i+1} T_\Gamma^{i+1}) R/\mu_{H_2O} S} \quad (3.32)$$

Определим количество испарившейся влаги из окатыша  $q_{\text{ж}}$  с единицы площади  $S$  за единицу времени (кг/м<sup>2</sup>с) по формуле Ленглиора [14]:

$$q_{\text{ж}} = 0,05883 (\rho^0 - \rho_{H_2O}^\Gamma) \sqrt{\frac{\mu_{H_2O}}{T_{\text{ок}}}}, \quad (3.33)$$

где  $S$  – площадь испарения.

Тогда

$$\rho_{\text{ок}} = \frac{m}{V} = - \frac{m(t, \alpha, x, x + \Delta x)}{N_{\text{ок}}(t, \alpha, x, x + \Delta x) \frac{4}{3} \pi R^3}, \quad (3.34)$$

где  $N_{\text{ок}}(t, \alpha, x, x + \Delta x)$  – число окатышей на отрезке.

Преобразуем выражение

$$\rho_{\text{ок}} = \frac{\frac{m(t, \alpha, x, x + \Delta x)}{\Delta x} / N_{\text{ок}}(t, \alpha, x, x + \Delta x) / 4}{\frac{\Delta x}{3}} \pi R^3 = \frac{4}{3} \pi R^3 = \frac{3P_1}{4\pi R^3 N_{\text{пр}}}, \quad (3.35)$$

$$N_{\text{пр}} = \frac{3P_1}{4\pi R^3 \rho_{\text{ок}}}.$$

здесь  $N_{\text{пр}}$  – приведенное количество окатышей на площади  $S$ .

$$S = N_{\text{пр}} 4\pi R^2 [H_2O], \quad (3.36)$$

$$S = \frac{3P_1}{4\pi R^3 \rho_{\text{ок}}} 4\pi R^2 [H_2O] = \frac{3P_2}{R\rho_{H_2O}}, \quad (3.37)$$

$$q_1 = 0,05883(\rho - \rho_{H_2O}) \sqrt{\frac{\mu_{H_2O}}{T_{\text{ок}}}} \frac{3P_2}{R\rho_{H_2O}}, \quad (3.38)$$

где  $\rho_{\text{ок}}$  – плотность окатыша, кг/м<sup>3</sup>;  $R$  – средний радиус окатыша, м.

Количество тепла, ушедшее из II зоны в I зону

$$g_2 = N_{\text{пр}} 4\pi R^2 0,52 [T_2 - T_1], \quad (3.39)$$

$$g_2 = \frac{3P_1}{R\rho_{\text{ок}}} 0,52 [T_2 - T_1] \quad (3.40)$$

Количество тепла, ушедшее из II зоны во внешнюю среду

$$g_3 = 0,03 \cdot (T_2 - T_1) \cdot \alpha \quad (3.41)$$

где  $\alpha$  – длина дуги, занимаемая газом, м;  $T_1, T_2$  – температура окатыша, К.

### 3.5.2 Обсуждение результатов

Коэффициенты моделей были получены при решении задачи идентификации методом Гаусса. Численное решение математической модели проведено модифицированным методом сеток [98].

Физический смысл критерия оптимального ведения процесса сушки окатышей следующий: получить минимальное содержание влаги в титановых окатышах за промежуток времени, определенный техническим заданием, без дополнительного расхода электроэнергии.

Математическая запись критерия, следующая:

$$\min_{h_c, G_r} \int_0^t \left( \frac{\partial P_2}{\partial t} + V \frac{\partial P_2}{\partial x} \right) dt, \quad (3.42)$$

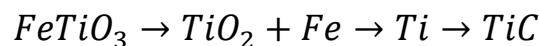
где  $G_r$  – расход газа;  $\partial P_2$  – высота слоя окатыша, при ограничениях  $10 \text{ мм} \leq h_c \leq 50 \text{ мм}$ ,  $G_{r \text{ min}} \leq G_r \leq G_{r \text{ max}}$ .

Разработана математическая модель оптимизации теплотехнологического

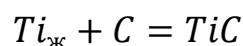
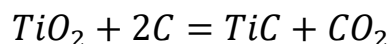
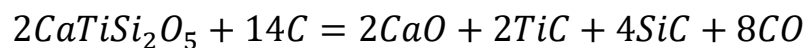
процесса сушки движущейся плотной многослойной массы титановых окатышей, позволившая оптимизировать и ресурсо-, и энергоэффективность сложной динамической теплотехнологической системы производства титановых окатышей. Полученные результаты применяли для расчета энергоэффективной сушки указанного материала в агрегате туннельного типа. Обнаружено, что в оптимальном режиме многослойной сушки окатышей снижается расход энергии и увеличивается качество готового продукта, уменьшается доля возврата, обеспечивая ресурсосбережение [106].

### 3.6 Моделирование процесса карботермического восстановления оксида металла с помощью итерационного алгоритма в системе Mathcad

Восстановление титана. Его содержание в продукте зависит от наличия в исходном сырье рутила ( $TiO_2$ ) и ильменита ( $FeTiO_3$ ). Последовательность восстановления ильменита в системе Si-O-C следующая:



Ильменит восстанавливается углеродом по реакции  $FeTiO_3 + C = TiO_2 + Fe + CO$  в интервале температур 1300-1400 °С. Процесс протекает без разложения ильменита на составные части. При этом восстановление закиси железа ускоряет процесс восстановления связанной с ним  $TiO_2$  и идет по реакциям  $FeTiO_3 + C = TiO_2 + Fe + CO$  и  $TiO_2 + 2C = TiC + CO_2$ . В связи с высокой концентрации углерода и CO, диоксид титана, титан и железо мгновенно связываются углеродом и образуют карбиды, определяемые реакциями:



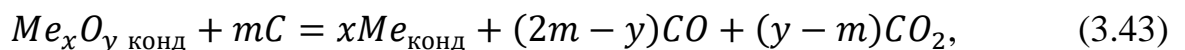
В сочетании с восстановлением сфена  $CaTiSi_2O_5$ , дополнительное количество TiC образуется в результате реакции  $2CaTiSi_2O_5 + 14C = 2CaO + 2TiC + 4SiC + 8CO$  при температурах от 1300 до 1400 °С. Карбид титана является

очень прочным соединением и не участвует в реакциях до 3000 °С, т.к. титан имеет большое сродство к углероду.

В результате химии восстановления и характеристики продуктов или промпродуктов, в частности их летучесть и степень уноса летучих соединений реакционными газами, определяют извлечение примесных металлов при плавке. Алюминий в виде AlO и Al<sub>2</sub>O и кальций в форме элементарного кальция являются двумя примерами летучих элементов на промежуточной стадии, которые в основном выдуваются и уносятся газами в пыль после плавления. К металлам, наименее склонным к уносу, относятся железо и титан. Приведенная информация о восстановлении железа, алюминия, кальция и титана при выплавке кремния демонстрирует возможность повышения степени извлечения примесей с помощью газов для очистки продукта и повышения его качества.

Мерами улучшения сортности титана могут явиться улучшение состава ильменита, качества восстановителя и внедрение технологии рафинирования [107].

Получение металлов из окисленных материалов в результате реакций с различными восстановителями применяется во многих металлургических технологиях, как в черной, так и цветной металлургии. Одним из наиболее часто используемых методов является восстановление оксида нелетучего металла твердым углеродом по сложной реакции:

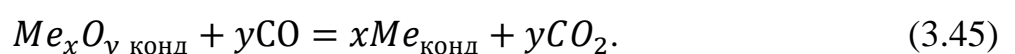


причем  $m$  принимает значения от 0,5 до  $y$  в зависимости от рода оксида и температуры.

Фактически реакция (3.43) состоит из нескольких параллельно протекающих процессов [108], в которых происходит окисление углерода с образованием угарного газа:



и восстановление металла окисью углерода с образованием углекислого газа:



Реакция восстановления оксида твердым углеродом по уравнениям (3.43-3.45) протекает с образованием газовой фазы. Когда давление образующихся газов превышает давление окружающей среды, фактически начинается реакция восстановления металла [109].

Давление газообразного продукта реакции складывается из парциальных давлений всех его составляющих:

$$P_{реакц} = P_{CO} + P_{CO_2} + P_{Me_xO_y} + P_{Me}^0 + (P_c + P_{O_2}) \quad (3.46)$$

При температурах до 2000 °С давление  $P_c$  и  $P_{O_2}$  очень малы и ими можно пренебречь, в большинстве случаев также низки по сравнению с  $P_{CO_2}$  и  $P_{CO}$  давления насыщенного паров  $Me_xO_y$  и  $Me$ .

Константа равновесия для первой реакции (3.45) вычисляется по формуле [110]:

$$K_B = \frac{P_{CO_2}}{P_{CO}}, \quad (3.47)$$

а для реакции (3.47) вычисляет по соотношению:

$$K_B = \frac{P_{CO}^2}{P_{CO_2}}. \quad (3.48)$$

Для каждой температуры  $K_B$  и  $K_B$  имеют определенные численные значения, и выражения для констант являются уравнениями с двумя неизвестными  $P_{CO}$  и  $P_{CO_2}$ .

Из системы двух уравнений с двумя неизвестными можно определить численные значения давлений газов:

$$P_{CO} = K_B K_B \quad (3.49)$$

$$P_{CO_2} = K_B K_B^2 \quad (3.50)$$

Далее, суммируя эти уравнения, можно найти общее давление газообразных продуктов реакции восстановления оксида твердым углеродом.

Восстановление конденсированного оксида твердым углеродом сопровождается большим увеличением объема системы вследствие образования газообразного продукта взаимодействия конденсированных веществ [109]. С позиций термодинамики для возможности увеличения объема системы

необходимо, чтобы давление продуктов реакции стало равным (или большим) давления окружающей среды – внешнего давления:

$$P_{\text{реакц}} \geq P_{\text{внешн}} \quad (3.51)$$

Уравнение (3.51) – критерий термодинамической возможности реакции восстановления оксида твердым углеродом, как и любой реакции между конденсированными фазами с выделением газов.

Вычисляя из уравнений значения для реакций (3.44) и (3.45) соответственно, можно найти константы равновесия  $K_B$  и  $K_{\text{B}}$  [110] из уравнений  $G_B^0 = -RT \ln K_B$ ,  $\Delta G_B^0 = -RT \ln K_{\text{B}}$ :

$$K_B = \exp\left(-\frac{\Delta G_B}{RT}\right) = \exp\left(-\frac{\Delta H_B^0 - T\Delta S_B^0}{RT}\right), \quad (3.52)$$

$$K_{\text{B}} = \exp\left(-\frac{\Delta G_{\text{B}}}{RT}\right) = \exp\left(-\frac{\Delta H_{\text{B}}^0 - T\Delta S_{\text{B}}^0}{RT}\right), \quad (3.53)$$

где  $R=8,314$  Дж/(моль К) – универсальная газовая постоянная.

Можно рассчитать  $P_{CO}$  и  $P_{CO_2}$  и вывести вероятность реакции при определенном давлении и температуре окружающей среды из уравнений (3.46) и (3.51), подставив полученные уравнения (3.52) и (3.53) в (3.49) и (3.50):

$$P_{\text{реакц}} \approx P_{CO} + P_{CO_2} \geq P_{\text{внешн}} \quad (3.54)$$

Восстановление оксидов металлов твердым углеродом математически описывается системой уравнений (3.49-3.54), которые можно использовать для расчета температуры и давления, при которых начинается восстановление оксидов металлов.

Для различных давлений газовой фазы рассчитаны термодинамические температуры начальных стадий прямого восстановления оксида металла твердым углеродом и определен равновесный состав газовой фазы.

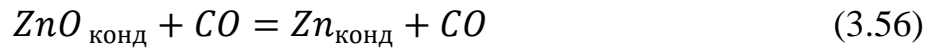
Для расчета необходимо решить следующее уравнение:

$$P_{CO} + P_{CO_2} - P = 0 \quad (3.55)$$

при различных давлениях окружающей среды, находящимся в пределах от  $P = P_0$  до  $P = P_z$ , с шагом  $\Delta P$ . Нахождение температуры  $T$  является решением, при которой уравнение (3.55) становится верным. Разделив раздел пополам, программное обеспечение используется для вычисления корней уравнения. Для



расчета используется программа поиска корней уравнения методом деления отрезка пополам [111]. Ниже приведено решение для восстановления оксида цинка по реакции:



При этом параллельно протекает реакция (3.44).

Программа в среде Mathcad для итерационного определения температуры начала восстановления металла твердым углеродом:

1) Задание начальных условий и функций:

$T$  – температура реакции,  $K$ .

$H1$  – энтальпия реакции восстановления оксида металла окисью углерода,  $Дж/моль$ .

$H2$  – энтальпия реакции Будуара-Белла,  $Дж/моль$ .

$H3$  – энтальпия образования оксида,  $-кДж/моль$ .

$S1$  – энтропия реакции восстановления оксида металла окисью углерода,  $Дж/моль \text{ град}$ .

$S2$  – энтропия реакции Будуара-Белла,  $Дж/моль \text{ град}$ .

$S3$  – энтропия оксида металла,  $Дж/моль \text{ град}$ .

$HV$  – константа равновесия реакции восстановления оксида металла окисью углерода.

$SV$  – константа реакции Будуара-Белла.

$R$  – универсальная газовая постоянная,  $Дж/моль K$ .

$P1$  – давление окружающей газовой среды (атмосферное),  $Атм$ .

$N$  – количество атомов кислорода в оксиде.

2) Исходные данные (таблица 3.2):

Таблица 3.2

Исходные данные для итерационного определения температуры начала восстановления металла твердым углеродом

$H1 := -393940$	$S1 := 213.6$
$H2 := -110375$	$S2 := 197.4$
$H3 := -349$	$S3 := 43.5$
$N := 1$	

$$R := 8.314$$

$$P1 := 1$$

3) Термодинамические соотношения (таблица 3.3):

Таблица 3.3

Термодинамические соотношения параметров и проверка вычислений

	Проверка вычислений
$HV := H1 - H2 - \frac{H3}{N} \cdot 1000$	$HV = 6.543 \cdot 10^4$
$SV := S1 - S2 - \frac{S3}{N}$	$SV = -27.3$
$HB := 2 \cdot H2 - H1$	$HB = 1.732 \cdot 10^5$
$SB := 2 \cdot S2 - S1$	$SB = 181.2$
$FV(T) := \exp\left(-\frac{HV - T \cdot SV}{R \cdot T}\right)$	$FV(500) = 5.467 \cdot 10^{-9}$
$FB(T) := \exp\left(-\frac{HB - T \cdot SB}{R \cdot T}\right)$	$FB(500) = 2.353 \cdot 10^{-9}$

4) Функция равновесия давлений:

$A$  – нижняя граница диапазона температур, град.  $K$

$B$  – верхняя граница диапазона температур, град.  $K$

$$F(T) := FV(T) \cdot FB(T) + FV(T)^2 \cdot FB(T) - P1$$

$$A := 300 \quad B := 3000 \quad F(A) = -1 \quad F(B) = 7.68 \cdot 10^3$$

5) Поиск температуры по встроенной функции *root* с границами  $A$  и  $B$ :

$$TK := \text{root}(F(T), T, A, B)$$

$$TK = 1.551 \cdot 10^3$$

начало  
восстановления цинка выше

$$TC := TK - 273 = 1.278 \cdot 10^3$$

градусов Цельсия

### 3.6.1 Итерационный расчет методом дихотомии

6) Программа поиска максимума температуры методом дихотомии:

$e$  – абсолютная точность решения по аргументу

$d$  – абсолютная точность решения по функции

$m$  – максимальное количество итераций

$$P(A, B, e, d, m, F) := \left| \begin{array}{l} p \leftarrow 0 \\ \text{while } (|B - A| > e \wedge p < m) \\ \quad | \quad A \leftarrow B \text{ if } |F(B)| < d \\ \quad | \quad B \leftarrow A \text{ if } |F(A)| < d \\ \quad | \quad M \leftarrow \frac{A + B}{2} \\ \quad | \quad \text{if } F(A) \leq 0 \wedge F(B) > 0 \\ \quad | \quad | \quad B \leftarrow M \text{ if } F(M) > 0 \\ \quad | \quad | \quad A \leftarrow M \text{ otherwise} \\ \quad | \quad \text{if } F(A) \geq 0 \wedge F(B) < 0 \\ \quad | \quad | \quad B \leftarrow M \text{ if } F(M) < 0 \\ \quad | \quad | \quad A \leftarrow M \text{ otherwise} \\ \quad | \quad p \leftarrow p + 1 \\ \quad T_0 \leftarrow \frac{A + B}{2} - 273 \\ \quad T_1 \leftarrow p \\ \quad T_2 \leftarrow B - A \\ \quad T \end{array} \right.$$

$$P(300, 3000, 0.1, 0.0001, 1000, F) = \begin{pmatrix} 1277.505 \\ 15 \\ 0.082 \end{pmatrix}$$

В первой строке – решение в °С.

Во второй строке – число итераций. Если число итераций равно нулю или максимуму, то решение не найдено.

В третьей строке – ошибка решения по аргументу.

Результатом расчета является температура восстановления оксид металла в заданных условиях, которая равна 1277.5 °С. Расчет выполнен за 15 итераций, с допустимым отклонением 0,082. Применение разработанного алгоритма может быть расширено на другие окисленные соединения металлов и для разных давлений окружающей среды.

Предложенная методика расчета является актуальной для имитационного моделирования и определения оптимальных условий проведения металлургических процессов, в том числе для разработки математических

моделей процессов сушки и обжига окатышей, которые содержат оксиды металла [112].

### 3.7 Некоторые особенности моделирования процесса теплообмена при рекуперации нагретого воздуха

Исследовано моделирование теплопередачи при рекуперации нагретого воздуха в стационарных условиях. Составлено математическое описание этой системы, проведены статические и динамические решения разработанной модели с применением итерационных алгоритмов поиска корней в пакете программ Mathcad. Полученные решения представлены в виде уравнений.

Как показано в работе Давидсона А.М. [113] производительность печи медной плавки возрастает при увеличении температуры подогрева дутья идущего для сжигания топлива (рисунок 3.3).

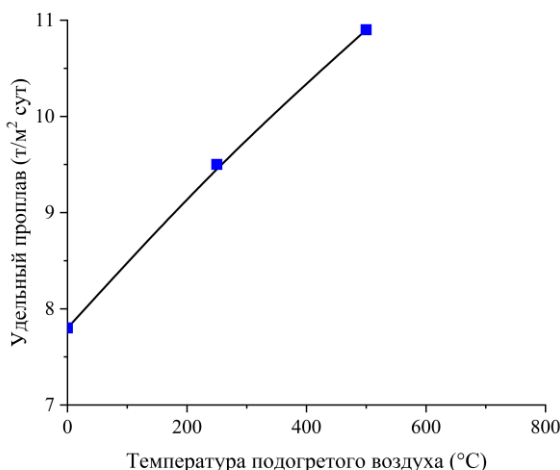


Рис. 3.3. Зависимость удельного проплава от температуры подогретого воздуха

Подогрев воздуха, идущего для сжигания топлива, обеспечивает повышение температуры горения, увеличение производительности, уменьшение расхода топлива и повышение к.п.д. печей. Целесообразность подогрева воздуха не вызывает сомнений, и практически, когда это возможно, применяется за счет использования тепла отходящих газов. Однако выбор температуры подогрева

воздуха обычно не связывается с размерами печи и условиями теплообмена внутри печи, поэтому получаемые результаты не всегда обеспечивают наибольший эффект. Аналогично, применение подогрева воздуха в обжиговых конвейерных машинах приводит к уменьшению объема газов, приходящихся на единицу перерабатываемого в печи материала, и к повышению температуры горения, что изменяет условия движения газового потока и теплообмена в печи.

### **3.7.1 Постановка задачи**

Улучшение конструкции промышленных теплообменников, средств разработки и систем управления становится возможным благодаря созданию моделей теплотехнических процессов. Многие объекты, используемые в теплотехнике, имеют дисперсные характеристики, для них характерны сложные процессы теплообмена, сопровождающиеся изменением физических свойств теплоносителя, особенно в газообразных средах [114]. К таким задачам применяются методы статического и динамического моделирования.

### **3.7.2 Описание установки**

Устройства, называемые теплообменниками, используются для передачи тепла от одной среды к другой. Рекуперативные теплообменники, также известные как рекуператоры, представляют собой разновидность теплообменников [115].

В рекуператорах горячая и холодная среды с различными температурами текут в пространстве, разделенном стенкой. Теплообмен происходит за счет конвективной теплоотдачи, а если одна из сред является излучающим газом, то и за счет теплового излучения. Примером таких аппаратов являются парогенераторы, подогреватели, конденсаторы, выпарные аппараты и т.д. Режим работы таких аппаратов в основном стационарный. Характер изменения

температур рабочих сред по поверхности рекуперативного теплообменного аппарата зависит от схемы их движения.

Расчет рекуператоров, работающих в стационарном режиме, ведется на основе уравнений теплового баланса и теплопередачи [116]. Изучение процесса теплопередачи и тепловой эффективности теплообменника проводится на моделирующей установке. Установка состоит из корпуса с установленными внутри теплообменными элементами, входных и выходных патрубков, термомпар, установленных на входе и выходе теплообменных элементов, расходомера холодного потока и автоматизированной системы управления. Установка также имеет внутренний электронагреватель и эмулятор печи с входным каналом [117].

Рабочую часть установки теплообменника типа «труба в трубе» составляют внутренняя труба  $d_{вх}$  с толщиной стенки 1 мм, по которой течет греющий теплоноситель, и концентрично расположенная с ней наружная труба с внутренним диаметром кожуха  $d_{ко}$ , по которой движется нагретый теплоноситель. В качестве теплоносителя используются воздух (газы) и вода. Внутренний и внешний диаметр трубы, а также длина трубы, которые используются для определения поверхности теплообмена, могут варьироваться в широких пределах [118].

В качестве объекта моделирования использовалась металлическая труба постоянного сечения. Нагретый газ или воздух проходит по трубе с постоянной скоростью, а из-за низкой скорости потока поперечное сечение трубы можно отрегулировать для получения оптимального режима перемещения для процессов математического описания. В связи с тем, что между газовой средой и твердой металлической поверхностью происходят процессы с теплообменом, при моделировании важно учитывать изменение объемов газа [119], а высокая скорость распространения тепла через металл позволяет считать, что температура металлических стенок не зависит от температуры газа, проходящего по трубе.

Ранее был предложен [120] итерационный численный подход для расчета теплообменников. Сглаженный зональный метод использован для повышения

точности оценок теплообмена после дальнейших достижений в численном моделировании указанных процессов [121].

### 3.7.3 Математическое описание

#### 3.7.3.1 Моделирование статике рекуператора нагретого воздуха

Поток тепла воздуха в трубах в одной зоне описывается уравнением:

$$Q_F(TF, TF0, vF0) := \frac{C_{AT} \cdot P_A \cdot vF0}{R_A} - \frac{C_{AT} \cdot P_A \cdot vF0}{R_A} \cdot \frac{TF}{TF0} \quad (3.57)$$

где  $C_{AT}$  – теплоемкость одного моля воздуха при атмосферном давлении  $P_A$ ;  $vF0$  – объемная скорость подачи теплоносителя на входе;  $R_A$  – универсальная газовая постоянная.

$$Q_F(TF, TF0, vF0) = 169.859$$

Конвективная теплопередача в одной зоне по трубе изнутри описывается уравнением:

$$Q_{FS}(TF, TS) := \alpha_{FS} \cdot \Delta Z_{FS}(TF - TS) \quad (3.58)$$

где  $\alpha_{FS}$  – коэффициент конвективной теплопередачи между трубой и теплоносителем;  $\Delta Z_{FS,i}$  – внутренняя поверхность теплообмена в трубе;  $T_F$   $T_S$  – температура поверхности трубы в одной зоне.

$$TS := 400 \quad Q_{FS}(TF, TS) = 582.908$$

Подставив выражения (3.43) и (3.44) в (3.45), получим итерационную формулу позволяющую рассчитать суммарный поток тепла воздуха  $Q_{F\Sigma}$  в каждой зоне:

$$Q_{F\Sigma}(TF, TS, TF0, vF0) := Q_F(TF, TF0, vF0) - Q_{FS}(TF, TS) \quad (3.59)$$

$$Q_{F\Sigma}(TF, TS, TF0, vF0) = -413.05$$

Конвективная теплопередача в одной зоне по трубе снаружи имеет вид:

$$Q_{SA}(TA, TS) := \alpha_{SA} \cdot \Delta Z_{SA}(TS - TA) \quad (3.60)$$

$$TA := 330 \quad Q_{SA}(TA, TS) = 90.72$$

Теплопередача вдоль труб между зонами рассчитывается уравнением:

$$Q_{SS}(TS0, TS) := \frac{\lambda_{ST} \cdot \Delta Z_{SS}}{\Delta L_T} \cdot (TS - TS0) \quad (3.61)$$

$$TS0 := 350 \quad Q_{SS}(TS0, TS) = 8.657$$

Подставив уравнения (3.58), (3.60) и (3.61) в (3.62) получим дифференциальное уравнение в виде:

$$dT S dt(TF, TS, TA, TS0, TS1) := \frac{Q_{FS}(TF, TS) - Q_{SA}(TA, TS) + Q_{SS}(TS0, TS) + Q_{SS}(TS, TS1)}{\Delta m_S \cdot C_{ST}} \quad (3.62)$$

$$TS1 := 450 \quad dT S dt(TF, TS, TA, TS0, TS1) = 0.154$$

Тепло потока воздуха в трубах в одной зоне:

$$Q_A(TA, TA0, vA0) := \frac{C_{AT} \cdot P_A \cdot vA0}{R_A} - \frac{C_{AT} \cdot P_A \cdot v(TA, TA0, vA0)}{R_A} \quad (3.63)$$

$$TA0 := 320 \quad vA0 := 4 \quad Q_A(TA, TA0, vA0) = -3.185 \times 10^4$$

Поток конвективно-диффузионного перемешивания в кожухе теплообменника описывается уравнением:

$$Q_{AA}(TA0, TA) := \frac{\gamma_{AT} \cdot \Delta Z_{AA}}{\Delta L_T} \cdot (TA - TA0) \quad (3.64)$$

$$Q_{AA}(TA0, TA) = 0.798$$

$$dT A dt(TA, TS, TA0, TA1, vA0) := \begin{cases} q \leftarrow Q_A(TA, TA0, vA0) + Q_{SA}(TA, TS) \\ q \leftarrow q + Q_{AA}(TA0, TA) + Q_{AA}(TA, TA1) \\ q \leftarrow \frac{R_A \cdot TA}{C_{AT} \cdot P_A \cdot \Delta V_A} \cdot q \end{cases}$$

$$TA1 := 340 \quad dT A dt(TA, TS, TA0, TA1, vA0) = -2.05 \times 10^3$$

### 3.7.3.2 Особенности рекуперации в динамическом режиме

Тепло потока воздуха в трубах в одной зоне описывается уравнением:

$$Q_F(TF, TF0, vF0) := \frac{C_{AT} \cdot P_A \cdot vF0}{R_A} - \frac{C_{AT} \cdot P_A \cdot v(TF, TF0, vF0)}{R_A} \quad (3.65)$$

$$Q_F(TF, TF0, vF0) = 1.699 \times 10^5$$

Конвективная теплопередача в одной зоне в трубе изнутри:

$$Q_{FS}(TF, TS) := \alpha_{FS} \cdot \Delta Z_{FS}(TF - TS) \quad (3.66)$$

$$TS := 400 \quad Q_{FS}(TF, TS) = 291.6$$

$$dT F dt(TF, TS, TF0, vF0) := \frac{R_A \cdot TF}{C_{AT} \cdot P_A \cdot \Delta V_F} (Q_F(TF, TF0, vF0) - Q_{FS}(TF, TS)) \quad (3.67)$$

$$dT F dt(TF, TS, TF0, vF0) = 8.453 \times 10^4$$

Конвективная теплопередача в одной зоне по трубе снаружи:



$$Q_{SA}(TA, TS) := \alpha_{SA} \cdot \Delta Z_{SA}(TS - TA) \quad (3.68)$$

$$TA := 330 \quad Q_{SA}(TA, TS) = 90.72$$

Теплопередача вдоль труб между зонами:

$$Q_{SS}(TS0, TS) := \frac{\lambda_{ST} \cdot \Delta Z_{SS}}{\Delta L_T} \cdot (TS - TS0) \quad (3.69)$$

$$TS0 := 350 \quad Q_{SS}(TS0, TS) = 8.657$$

$$dT S dt(TF, TS, TA, TS0, TS1) := \frac{Q_{FS}(TF, TS) - Q_{SA}(TA, TS) + Q_{SS}(TS0, TS) + Q_{SS}(TS, TS1)}{\Delta m_S \cdot C_{ST}} \quad (3.70)$$

$$TS1 := 450 \quad dT S dt(TF, TS, TA, TS0, TS1) = 0.066$$

Тепло потока воздуха в трубах в одной зоне:

$$Q_A(TA, TA0, vA0) := \frac{C_{AT} \cdot P_A \cdot vA0}{R_A} - \frac{C_{AT} \cdot P_A \cdot v(TA, TA0, vA0)}{R_A} \quad (3.71)$$

$$TA0 := 320 \quad vA0 := 4 \quad Q_A(TA, TA0, vA0) = -3.185 \times 10^4$$

Поток конвективно-диффузионного перемешивания в кожухе теплообменника:

$$Q_{AA}(TA0, TA) := \frac{\gamma_{AT} \cdot \Delta Z_{AA}}{\Delta L_T} \cdot (TA - TA0) \quad (3.72)$$

$$Q_{AA}(TA0, TA) = 0.798$$

$$dT A dt(TA, TS, TA0, TA1, vA0) := \begin{cases} q \leftarrow Q_A(TA, TA0, vA0) + Q_{SA}(TA, TS) \\ q \leftarrow q + Q_{AA}(TA0, TA) + Q_{AA}(TA, TA1) \\ q \leftarrow \frac{R_A \cdot TA}{C_{AT} \cdot P_A \cdot \Delta V_A} \cdot q \end{cases}$$

$$TA1 := 340 \quad dT A dt(TA, TS, TA0, TA1, vA0) = -2.05 \times 10^3$$

В работе представлены модели теплообмена в статических и динамических режимах. Предложен сглаженный зональный метод расчета теплопередачи в стационарных условиях, основанный на усреднении температур в начальной и конечной зоне, позволяющий повысить точность моделирования.

Полученные результаты исследования могут применяться как для исследования процессов теплообмена в разных режимах, так и в учебном процессе, и для рекомендации научным сотрудникам в области моделирования и оптимизации теплотехнических процессов [122].

### 3.8 Выводы по третьей главе

1. Разработаны математические модели, которые связывают содержание влаги в титановых окатышах за определенный промежуток времени, без дополнительного расхода электроэнергии.
2. Получены модели сушки титановых окатышей с учетом оптимальных параметров перераспределения влаги и теплообмена, которые предотвращают негативные влияния на процесс.
3. Разработана математическая модель карботермического восстановления ильменитового концентрата с учетом использования железотитанистых руд, которая позволяет улучшить сортность металла с извлечением примесей, а также в целях очистки продукта и исследовать дальнейший передел производства титана.
4. Полученные результаты позволяют определить оптимальные режимы процесса сушки и приступить к разработке математических моделей методами регрессионного анализа зависимости влажности шихты от его газодинамических параметров и разработать метод и устройство для контроля газопроницаемости шихты в обжиговой конвейерной машине, который позволяет непрерывно поддерживать максимальную газопроницаемость слоя шихты и наилучшие показатели процесса при воздействии на процесс неконтролируемых возмущений.

## 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ШИХТЫ И УСТРОЙСТВО ДЛЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ТИТАНОВЫХ ОКАТЫШЕЙ

### 4.1 Влияние показателей влажности и газопроницаемости

Эффективное решение задачи оптимального управления любым сложным объектом, как правило, связано с достаточно полным рассмотрением физической сущности протекающих в нем процессов и анализом их особенностей. При этом первоочередной задачей является построение математической модели объекта управления, позволяющей осуществить выбор структуры и параметров системы управления, формирование критериев оптимальности и ограничений, решение задач прогнозирования и т.д. [123, 124].

Способ подачи воды в шихту оказывает значительное влияние на процесс окомкования, особенно в шихту с тонкоизмельченными концентратами. Когда вода распыляется в шихту, поверхность частиц смачивается и создается водяная пленка. Благодаря поверхностному натяжению воды при соприкосновении влажных частиц друг с другом образуются жидкие мостики (рисунок 4.1).

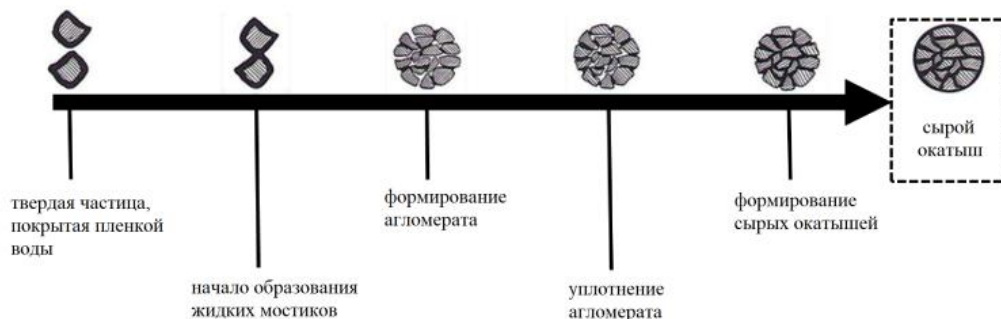


Рис. 4.1. Этапы формирования сырых окатышей

Добавлять воду в смесь следует с помощью специализированных форсунок, обеспечивающих тонкое распыление, а не струи через отверстия водовода. С помощью этой методики удастся предотвратить образование крупных комков (15-30 мм) из одного концентрата, которые не пропекаются в процессе и служат местами разрушения окатышей.

Нахождение предельного значения интенсивности влажности шихты имеет решающее значение для создания рациональной технологии окомкования. С одной стороны, интенсивность окомкования увеличивается с увеличением скорости подачи воды в шихту; с другой стороны, потребление энергии уменьшается с уменьшением длины барабана гранулятора. Тем не менее, для такого режима также характерно неравномерное распределение воды по объему шихты, что, естественно, ухудшает процесс окомкования. Эта ситуация особенно критична при окомковании тонкоизмельченных концентратов.

Важным этапом в производстве окатышей является процесс увлажнения шихты (исходного сырья) для достижения её оптимальной газопроницаемости с целью увеличения производительности обжиговых машин и повышения качества готового продукта. Газопроницаемость шихты в сильной степени зависит от её абсолютной влажности. Для материала данного минералогического и гранулометрического состава существует только одно оптимальное значение влажности, которое с возможной степенью точности необходимо поддерживать вручную или автоматически [47, 125].

На практике влажность шихты колеблется в широких пределах из-за, например, изменений давления воды в водопроводе и изменений массы шихты, проходящей через окомкователь в единицу времени. Кроме того, все время меняется минералогический и гранулометрический составы сырья, а вместе с ними и величина оптимальной влажности шихты, соответствующей максимальной газопроницаемости [126].

Газопроницаемость окомкованной агломерационной шихты определяется тремя факторами: гранулометрическим составом исходной шихты, содержанием влаги и режимом окомкования [27].

Результаты исследования Г.И. Волковицкого, Н.М. Якубцинера, Ю.П. Смирнова, Н.З. Плоткина, В.И. Коротича [127] показали, что при изменении влажности существенно меняются свойства окомкованной шихты: насыпная масса, прочность комочков, структура слоя и его газопроницаемость. Типичный характер зависимости этих параметров от влажности шихты показали, что при постепенном увеличении влажности шихты уменьшается ее насыпная масса (увеличивается пористость слоя), растет газопроницаемость. Шихта получает минимальное значение по достижении определенной влажности насыпной массы, с дальнейшим увеличением влажности пористость слоя начинает падать, а газопроницаемость продолжает расти. Такая зависимость характеризуется изменением режима окомкования и соответственно изменением структуры шихты [80, 106]. В дальнейшем проанализировав результаты, авторы пришли к выводу, что значение оптимальной влажности шихты, при котором получается максимальная вертикальная скорость спекания, примерно на 1 % меньше влажности, соответствующей наибольшей газопроницаемости исходной шихты.

Таким образом, газопроницаемость может служить основным показателем, определяющим качество окатышей и процесса их обжига. Экспериментальные данные (таблица 4.1), которые приведены в работе [127] дают графические выражения взаимосвязи следующих параметров процесса: скорость просасывания воздуха  $V$ , насыпной масса  $d$ , усадки слоя  $\Delta h$  и скорость перемещения зоны сушки  $\vartheta_1$  в зависимости от влажности шихты  $W$ . Скорость просасывания воздуха при прочих равных условиях однозначно характеризует газопроницаемость слоя шихты.

Таблица 4.1

Экспериментальные данные для моделирования и поиск оптимальных параметров процесса

Функция имеет	Переменная				
	Влажность шихты $W$ , %	Скорость просасывания воздуха $V$ , м/сек	Насыпная масса $d$ , кг/дм <sup>3</sup>	Усадка слоя $\Delta h$ , мм	Скорость перемещения зоны сушки $\vartheta_1$ , м/сек
	0			0,6	
	1	0,05	2,14	1,4	
	2	0,25	2,04	2	

	3	0,53	1,95	3	
	4	0,78	1,89	4	
	4,5				9,7
max	4,7			4,6	
	5	0,82	1,85	4,5	11,1
min	5,4		1,845		
	6	0,86	1,855	3,6	12,9
max	6,15				13
max	6,2	0,87			
	7	0,81	1,91	2	12
	8	0,76	1,98		9,7
	9	0,7			

## 4.2 Математическое моделирование процесса

Целью моделирования любого технологического процесса является установление количественной зависимости выходного параметра от одного или группы входных параметров, которые могут изменяться случайно [128].

Результаты данного исследования позволяют получить математические модели, с помощью которых можно найти близко к исходной величине оптимальные значения влажности и газодинамических параметров шихты. Построение аппроксимирующих и интерполирующих функций осуществляется применением возможностей программы Mathcad. Для обработки результатов по известным экспериментальным данным были использованы методы регрессии общего вида и полиномиальной регрессии [129, 130]. Окончательно приняты модели, дающие наиболее точность.

Как правило, регрессия очень эффективна, когда заранее известен (или, по крайней мере, хорошо угадывается) закон распределения данных  $(x_1, y_1)$  [131].

Далее приведены результаты, выполненные в системе Mathcad, подготовка исходных данных, регрессия общего вида, полиномиальная регрессия, расчет погрешностей интерполяции и графическая иллюстрация результатов вычислений обработки данных.

На основе экспериментальных и расчетных данных сформированы координаты исходных точек в виде матрицы. Математическая обработка экспериментальных результатов позволила получить приведенные ниже уравнения регрессии, связывающие влажность шихты на скорость просасывания воздуха через слой шихты (1), насыпную массу (2), усадку слоя (3) и скорость перемещения зоны сушки (4).

$$VX := \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 7.2 \\ 8 \end{pmatrix}$$

$$VY := \begin{pmatrix} 0 \\ 0.07 \\ 0.27 \\ 0.53 \\ 0.67 \\ 0.85 \\ 0.86 \\ 0.8 \end{pmatrix}$$

$$F(X) := \begin{pmatrix} 1 \\ \bar{X} \\ X^3 \\ e^X \end{pmatrix}$$

$$K := \text{linfit}(VX, VY, F)$$

$$K = \begin{pmatrix} 2.493 \times 10^{-3} \\ 3.877 \times 10^{-3} \\ -4.066 \times 10^{-4} \end{pmatrix}$$

$$g(t) := F(t) \cdot K$$

$$r := 2, 2.25..8.25$$

$$i := 0..7$$

$$Wr_n := g(VX_n)$$

$$Wr = \begin{pmatrix} 0.029 \\ 0.097 \\ 0.227 \\ 0.425 \\ 0.674 \\ 0.884 \\ 0.903 \\ 0.773 \end{pmatrix}$$

Так как  $F \gg qF$  модель адекватна экспериментальным данным с доверительной вероятностью  $\gamma$ . Высокое значение коэффициента корреляции подтверждает этот результат (таблица 4.2).

Таблица 4.2

Проверка адекватности модели (скорость просасывания воздуха через слой шихты – влажность шихты) экспериментальным данным

$R := \text{corr}(VY, Wr)$	$R=0.99$	Коэффициент корреляции
$e_i := Wr_i - VY_i$		Вектор ошибок
$De := \text{var}(e)$	$De=2.265 \times 10^{-3}$	Остаточная дисперсия
$Dy := \text{var}(VY)$	$Dy=0.107$	Дисперсия относительно среднего

$F := \frac{Dy}{De}$	F=47.422	Расчетное значение критерия Фишера
$\gamma := 0.95$		
$qF(\gamma,7,5)=4.876$		Табличное значение критерия Фишера

В результате обработки экспериментальных данных получено следующее уравнение регрессии:

$$\vartheta(\omega) = 2,493 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1}{\omega} + 3.877 \cdot 10^{-3} \cdot \omega^3 - 4.066 \cdot 10^{-4} \cdot e^{\omega} \quad (4.1)$$

где  $R=0.99$  – коэффициент корреляции,  $F_{\text{расч}}=47.422$ ,  $F_{\text{табл}}=4.876$  – расчетное и табличное значения критерии Фишера для доверительной вероятности  $\gamma=0.95$ .

Поиск оптимального параметра по методу деления пополам

$$F(x) := 2,493 \cdot 10^{-3} \cdot x^{-1} + 3.877 \cdot 10^{-3} \cdot x^3 - 4.066 \cdot 10^{-4} \cdot e^x \quad (4.2)$$

$$x := 2,2.1.8$$

```

                                i ← 0
                                while |b - a| > e
                                  | i ← i + 1
                                  | c ← (a + b) / 2
                                  | d ← (a + c) / 2
                                  | p ← (c + b) / 2
                                  | if F(d) > F(c)
                                  |   | b ← c
                                  |   | c ← d
                                  |   | if F(p) > F(c)
                                  |   |   | a ← c
                                  |   |   | b ← p
                                  |   | otherwise
                                  |   |   | a ← d
                                  |   |   | b ← p
                                  |   X₀ ← (a + b) / 2
                                  |   X₁ ← i
                                  |   X

```

$$Od(2,10,0.001,F) = \left( \begin{matrix} 7.333 \\ 7 \end{matrix} \right)$$

$$Opt := F(7.333)$$

$$Opt = 0.907$$



На основе уравнения (4.1) приведен график зависимости влажности шихты  $\omega$  на скорость просасывания воздуха  $\vartheta$  (рисунок 4.2). Полученная модель сходится с экспериментальными данными.

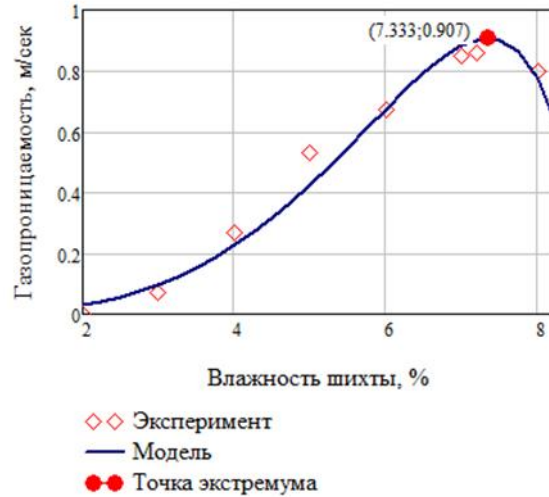


Рис. 4.2. График влияния влажности шихты  $\omega$  (%) на скорость просасывания воздуха  $\vartheta$  (м/сек)

$$VX := \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 5.4 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \end{pmatrix} \quad VY := \begin{pmatrix} 2.14 \\ 2.04 \\ 1.95 \\ 1.89 \\ 1.85 \\ 1.845 \\ 1.855 \\ 1.91 \\ 1.98 \end{pmatrix} \quad i := 0..8$$

$$R := \text{regress}(VX, VY, 3)$$

$$R^T = (3 \quad 3 \quad 3 \quad 2.262 \quad -0.125 \quad 4.357 \times 10^{-3} \quad 8.678 \times 10^{-4})$$

$$S(t) := \text{interp}(R, VX, VY, t) \quad t := 1, 1.1 \dots 9$$

$$Wr_i := D(VX_i)$$

$$W_r^T = (2.142 \quad 2.036 \quad 1.95 \quad 1.887 \quad 1.854 \quad 1.851 \quad 1.856 \quad 1.898 \quad 1.985)$$

Так как  $F \gg qF$  модель адекватна экспериментальным данным с доверительной вероятностью  $\gamma$ . Высокое значение коэффициента корреляции подтверждает этот результат (таблица 4.3).

Проверка адекватности модели (насыпная масса – влажность шихты) экспериментальным данным

$R := \text{corr}(VY, Wr)$	$R=0.998$	Коэффициент корреляции
$e_i := Wr_i - VY_i$		Вектор ошибок
$De := \text{var}(e)$	$De=2.738 \times 10^{-5}$	Остаточная дисперсия
$Dy := \text{var}(VY)$	$Dy=8.828 \times 10^{-3}$	Дисперсия относительно среднего
$F := \frac{Dy}{De}$	$F=322.434$	Расчетное значение критерия Фишера
$\gamma := 0.95$		
$qF(\gamma, 7, 5)=4.876$		Табличное значение критерия Фишера

Влияние влажности шихты на насыпную массу аппроксимировано следующим уравнением регрессии:

$$d(\omega) = 8.678 \cdot 10^{-4} \cdot \omega^3 + 4.357 \cdot 10^{-3} \cdot \omega^2 - 0.125 \cdot \omega + 2.262 \quad (4.3)$$

где  $R=0.998$  – коэффициент корреляции,  $F_{\text{расч}}=322.434$ ,  $F_{\text{табл}}=4.876$  – расчетное и табличное значения критерии Фишера для доверительной вероятности  $\gamma=0.95$ .

#### Поиск оптимального параметра по методу золотого сечения

Поиск минимума функции  $F(x)$

$$F(x) := 8.678 \cdot 10^{-4} \cdot x^3 + 4.357 \cdot 10^{-3} \cdot x^2 - 0.125 \cdot x + 2.262 \quad (4.4)$$

Функция  $F(x)$  имеет максимум, а программа ZOL (a, b, f) предназначена для поиска минимума, поэтому меняем знак функции на противоположный см. рисунок 4.3.

$$f(x) := -F(x)$$

$$x := 1,1.1.8$$

$$\begin{array}{l}
 ZOL(a, b, f) := \begin{array}{l}
 e \leftarrow 1 \\
 i \leftarrow 1 \\
 T1 \leftarrow 0.381966 \\
 T2 \leftarrow 1 - T1 \\
 x0 \leftarrow a \\
 x1 \leftarrow a + T1(b - a) \\
 x2 \leftarrow a + T2(b - a) \\
 x3 \leftarrow b \\
 F1 \leftarrow f(x1) \\
 F2 \leftarrow f(x2) \\
 \text{while } e > 0.0005 \\
 \quad i \leftarrow i + 1 \\
 \quad \text{if } F2 < F1 \\
 \quad \quad e \leftarrow x3 - x1 \\
 \quad \quad x0 \leftarrow x1 \\
 \quad \quad x1 \leftarrow x2 \\
 \quad \quad x2 \leftarrow x0 + T2 \cdot e \\
 \quad \quad F1 \leftarrow F2 \\
 \quad \quad F2 \leftarrow f(x2) \\
 \quad \quad e \leftarrow x2 - x0 \\
 \quad \quad x3 \leftarrow x2 \\
 \quad \quad x2 \leftarrow x1 \\
 \quad \quad x1 \leftarrow x0 + T1 \cdot e \\
 \quad \quad F2 \leftarrow F1 \\
 \quad \quad F1 \leftarrow f(x1) \\
 \quad \quad R \leftarrow \begin{pmatrix} i \\ x1 \\ F1 \end{pmatrix}
 \end{array}
 \end{array}$$

$$B := ZOL(1,8,F) \qquad B = \begin{pmatrix} 11 \\ 5.326 \\ 1.851 \end{pmatrix}$$

Решение  $B$  выдало значение оптимума для функции с минимумом, поэтому вычисляем оптимум для исходной функции.

$$opt := F(B_1) \qquad opt = 1.851$$

Результаты расчета приведены на рисунке 4.3.

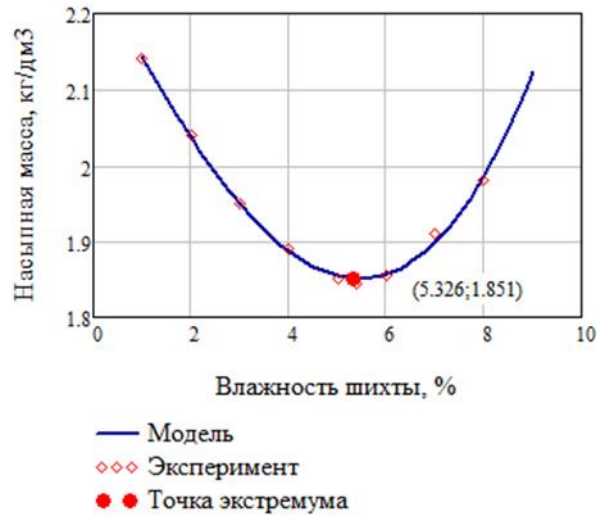


Рис. 4.3. Влияние влажности шихты  $\omega$  (%) на насыпную массу шихты  $d$  (кг/дм<sup>3</sup>)

$$VX := \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 4.7 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 7.8 \end{pmatrix} \quad VY := \begin{pmatrix} 0.6 \\ 1.4 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 4.6 \\ 4.5 \\ 3.6 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix} \quad i := 0..9$$

$$R := \text{regress}(VX, VY, 3)$$

$$R^T = (3 \quad 3 \quad 3 \quad 0.646 \quad 0.26 \quad 0.348 \quad -0.05)$$

$$S(t) := \text{interp}(R, VX, VY, t) \quad t := 0, 0.1 \dots 9$$

$$Wr_i := D(VX_i)$$

$$Wr^T = (0.646 \quad 1.204 \quad 2.158 \quad 3.208 \quad 4.054 \quad 4.364 \quad 4.396 \quad 3.934 \quad 2.368 \quad 0.119)$$

Так как  $F \gg qF$  модель адекватна экспериментальным данным с доверительной вероятностью  $\gamma$ . Высокое значение коэффициента корреляции подтверждает этот результат (таблица 4.4).

Таблица 4.4

Проверка адекватности модели (усадка слоя – влажность шихты) экспериментальным данным

$R := \text{corr}(VY, Wr)$	$R=0.992$	Коэффициент корреляции
$e_i := Wr_i - VY_i$		Вектор ошибок
$De := \text{var}(e)$	$De=0.038$	Остаточная дисперсия
$Dy := \text{var}(VY)$	$Dy=2.364$	Дисперсия относительно

		среднего
$F := \frac{Dy}{De}$	$F=61.758$	Расчетное значение критерия Фишера
$\gamma := 0.95$		
$qF(\gamma,9,8)=3.388$		Табличное значение критерия Фишера

Влияние влажности шихты на усадку слоя представлено следующим уравнением регрессии:

$$\Delta h(\omega) = -0.05 \cdot \omega^3 + 0.348 \cdot \omega^2 + 0.26 \cdot \omega + 0.646 \quad (4.5)$$

где  $R=0.992$  – коэффициент корреляции,  $F_{\text{расч}}=61.758$ ,  $F_{\text{табл}}=3.388$  – расчетное и табличное значения критерия Фишера для доверительной вероятности  $\gamma=0.95$ .

Поиск оптимального параметра по методу деления пополам

$$F(x) := -0.05 \cdot x^3 + 0.348 \cdot x^2 + 0.26 \cdot x + 0.646 \quad (4.6)$$

$$x := 0,0.1..7.8$$

```

Od(a, b, e, F) :=
    i ← 0
    while |b - a| > e
        i ← i + 1
        c ← (a + b) / 2
        d ← (a + c) / 2
        p ← (c + b) / 2
        if F(d) > F(c)
            b ← c
            c ← d
        if F(p) > F(c)
            a ← c
            b ← p
        otherwise
            a ← d
            b ← p
    X0 ← (a + b) / 2
    X1 ← i
    X

```

$$Od(0,7.8,0.001,F) = \binom{4.956}{8} \quad Opt := F(4.956) \quad Opt = 4.396$$

На основе уравнения регрессии (4.5) приведен график зависимости влажности шихты от усадки слоя (рисунок 4.4).



Рис. 4.4. Влияние влажности шихты  $\omega$  (%) на усадку слоя шихты  $\Delta h$  (мм)

$$VX := \begin{pmatrix} 4.5 \\ 5 \\ 6 \\ 6.15 \\ 7 \\ 8 \end{pmatrix} \quad VY := \begin{pmatrix} 9.7 \\ 11.1 \\ 12.9 \\ 13 \\ 12 \\ 9.7 \end{pmatrix} \quad i := 0..5$$

$$R := regress(VX, VY, 3)$$

$$R^T = (3 \quad 3 \quad 3 \quad -42.536 \quad 20.386 \quad -2.242 \quad 0.064)$$

$$S(t) := interp(R, VX, VY, t) \quad t := 4.5, 4.6 .. 8.5$$

$$Wr_i := D(VX_i) \quad Wr_r^T = (9.632 \quad 11.344 \quad 12.892 \quad 12.927 \quad 12.26 \quad 9.832)$$

Так как  $F \gg qF$  модель адекватна экспериментальным данным с доверительной вероятностью  $\gamma$ . Высокое значение коэффициента корреляции подтверждает этот результат (таблица 4.5).

Таблица 4.5

Проверка адекватности модели (скорость перемещения зоны сушки – влажность шихты) экспериментальным данным

$R := corr(VY, Wr)$	$R=0.995$	Коэффициент корреляции
$e_i := Wr_i - VY_i$		Вектор ошибок
$De := var(e)$	$De=0.019$	Остаточная дисперсия
$Dy := var(VY)$	$Dy=1.84$	Дисперсия относительно

		среднего
$F := \frac{Dy}{De}$	$F=96.03$	Расчетное значение критерия Фишера
$\gamma := 0.95$		
$qF(\gamma,7,5)=4.876$		Табличное значение критерия Фишера

Влияние влажности шихты на скорость перемещения зоны сушки представлено следующим уравнением регрессии:

$$\vartheta_1(\omega) = 0.064 \cdot \omega^3 - 2.242 \cdot \omega^2 + 20.386 \cdot \omega - 42.536 \quad (4.7)$$

где  $R=0.995$  – коэффициент корреляции,  $F_{\text{расч}}=96.03$ ,  $F_{\text{табл}}=4.876$  – расчетное и табличное значения критерии Фишера для доверительной вероятности  $\gamma=0.95$ .

Поиск оптимального параметра по методу деления пополам

$$F(x) := 0.064 \cdot x^3 - 2.242 \cdot x^2 + 20.386 \cdot x - 42.536 \quad (4.8)$$

$$x := 4.5, 4.6, \dots, 8.5$$

```

Od(a, b, e, F) :=
    i ← 0
    while |b - a| > e
        i ← i + 1
        c ← (a + b) / 2
        d ← (a + c) / 2
        p ← (c + b) / 2
        if F(d) > F(c)
            b ← c
            c ← d
        if F(p) > F(c)
            a ← c
            b ← p
        otherwise
            a ← d
            b ← p
        X0 ← (a + b) / 2
        X1 ← i
        X

```

$$Od(4.5, 8.5, 0.001, F) = \left( \frac{6.167}{7} \right)$$

$$Opt := F(6.167)$$

$$Opt = 12.928$$

Результаты расчета приведены на рисунке 4.5.

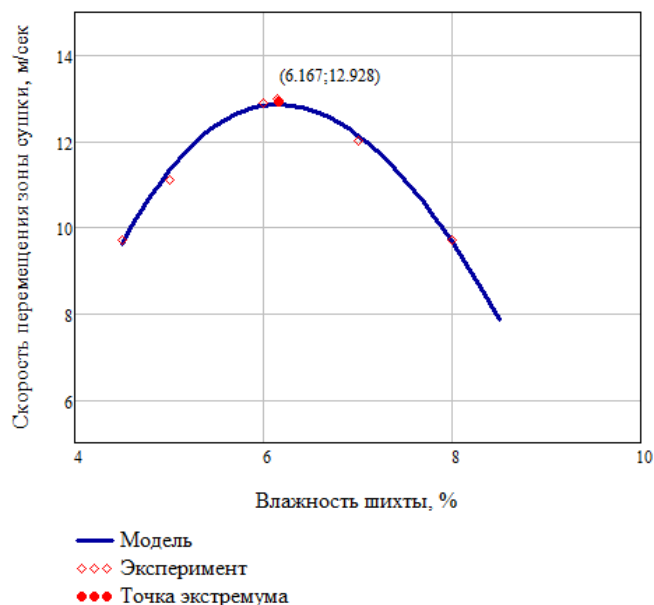


Рис. 4.5. Влияние влажности шихты  $\omega$  (%) на скорость перемещения зоны сушки  $\vartheta_1$  (м/сек)

В результате проведенного анализа по поиску оптимума влажности шихты было установлено, что максимальная газопроницаемость шихты достигается при влажности 7,333 %. Каждый используемый метод предполагает своё решение, направленное на нахождение оптимальной влажности. Установлено, что экстремум основных технологических параметров процесса сушки окатышей, таких как насыпная масса, усадка слоя, скорость перемещения зоны сушки, что позволило сделать вывод о возможности оптимизации процесса сушки титановых окатышей [132-134].

### 4.3 Устройство для производства титановых окатышей

Отсутствие возможности регулирования газопроницаемости шихты, снижает качественные показатели готового продукта. Это связано с тем, что при низкой газопроницаемости обжиг пройдет не до конца, в связи с чем, часть продукта уйдет в оборот, при этом снизится производительность и повысятся энергетические и временные затраты на процесс обжига. Повышенная газопроницаемость приведет к чрезмерному спеканию компонентов внутри



окатышей, так как обжиг идет с более высокой скоростью. Кроме того, в случае изменения состава шихты, поступающей на обжиговую машину, практически невозможно быстро оптимизировать ее газопроницаемость, зависящую от количества воды, подаваемой на гранулятор. При недостаточной или избыточной влажности шихты сопротивление слоя будет повышенное, а газопроницаемость, соответственно, пониженная. Это приведёт к снижению скорости спекания, и часть продукта пойдет в оборот, что приведет к дополнительным затратам на процесс обжига.

Предлагаемое устройство предназначено для управления процессом подготовки шихты в производстве титановых окатышей, а именно для повышения качества шихты за счет повышения ее газопроницаемости [135-139].

При воздействии на процесс неконтролируемых возмущений (гранулометрический состав шихты, её температура, высота слоя шихты), положение экстремума будет смещаться. Для компенсации этих воздействий предлагается оснастить обжиговую машину измерительной вакуум-камерой (ИВК), которая устанавливается на входе машины перед первой рабочей камерой. ИВК оснащается индивидуальным насосом для просасывания воздуха (рисунок 4.6).

Разрежение в ИВК стабилизируется системой автоматического регулирования. При этих условиях расход воздуха через ИВК полностью соответствует газопроницаемости слоя шихты. Величина расхода воздуха через ИВК подается на вход экстремального регулятора, управляющего подачей воды в окомкователь. Такая система непрерывно поддерживает максимальную газопроницаемость слоя шихты и наилучшие показатели процесса.

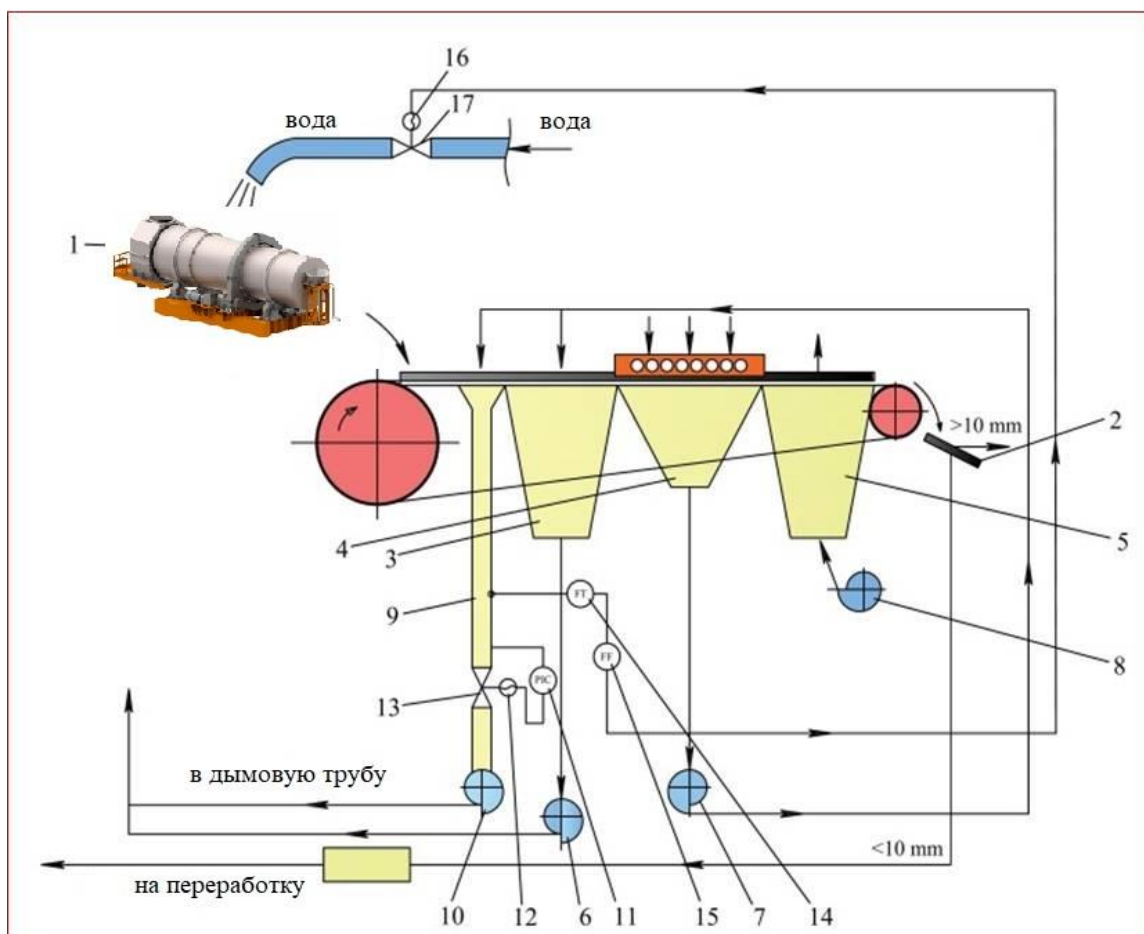


Рис. 4.6. Обжиговая машина с установленной измерительной вакуум-камерой (ИВК): 1 – окомкователь; 2 – грохот; 3 – вакуум камера зоны сушки; 4 – вакуум камера зоны обжига; 5 – вакуум камера зоны охлаждения; 6, 7, 8, 10 – индивидуальные вакуум насосы; 9 – измерительная вакуум камера; 11 – датчик контроля разрежения; 12, 16 – исполнительный механизм; 13, 17 – заслонка; 14 – датчик контроля расхода воздуха; 15 – экстремальный регулятор

Техническим результатом заявленного изобретения является упрощение управления процессом обжига, повышение качества готового продукта за счет оперативного управления элементами устройства и оптимизация газопроницаемости слоя шихты.

Технический результат достигается тем, что устройство для регулирования подготовки шихты в производстве титановых окатышей, включающее гранулятор, грохот и обжиговую машину, содержащую зоны подогрева и сушки, зону обжига и зону охлаждения с соответствующими вакуум-камерами и индивидуальными вакуумными насосами, согласно изобретению, устройство дополнительно снабжено измерительной вакуум-камерой, соединенной с индивидуальным вакуумным насосом, установленной на обжиговой машине перед вакуум-камерой

зоны сушки, причем измерительная вакуум-камера включает систему стабилизации разрежения с датчиком контроля разрежения и исполнительным механизмом и систему контроля расхода воздуха с датчиком контроля расхода воздуха и экстремальным регулятором, связанным через исполнительный механизм с заслонкой регулирования расхода воды.

Данное устройство позволит упростить управление процессом обжига, повысить качество готового продукта за счет оперативного управления элементами устройства и оптимизации газопроницаемости слоя шихты.

Устройство для регулирования подготовки шихты в производстве титановых окатышей включает гранулятор 1, грохот 2 и обжиговую машину, содержащую зоны подогрева и сушки, зону обжига и зону охлаждения с соответствующими вакуум-камерами 3, 4 и 5, а также индивидуальными вакуумными насосами 6, 7 и 8. Устройство дополнительно снабжено измерительной вакуум-камерой 9, соединенной с индивидуальным вакуумным насосом 10 и установленной на обжиговой машине перед вакуум-камерой 3 зоны сушки. Измерительная вакуум-камера 9 снабжена системой стабилизации разрежения и системой контроля расхода воздуха. При этом система стабилизации разрежения включает датчик 11 контроля разрежения, исполнительный механизм 12 и заслонку 13, установленную на вакуум-камере 9, а система контроля расхода воздуха включает датчик 14 контроля расхода воздуха и экстремальный регулятор 15, связанный через исполнительный механизм 16 с заслонкой 17 регулирования расхода воды.

Устройство работает следующим образом.

Шихту подают на гранулятор 1, где происходит ее окомкование. Затем сырые окатыши поступают в зону сушки обжиговой машины. С помощью вакуумного насоса 10 воздух просасывают через слой сырых окатышей в измерительную вакуум-камеру 9, в которой разрежение стабилизируют системой стабилизации разрежения. При этом значения разрежения фиксирует датчик 11 контроля разрежения, который, в свою очередь, подает сигнал на исполнительный механизм 12, управляющий заслонкой 13. С помощью изменения положения

заслонки 13 система стабилизации разрежения поддерживает его значение в вакуум-камере 9 постоянным. При постоянном разрежении в вакуум-камере 9 расход воздуха через нее зависит от газопроницаемости слоя окатышей. Для управления газопроницаемостью сигнал с датчика 14 контроля расхода воздуха, проходящего через вакуум-камеру 9, поступает на вход экстремального регулятора 15, который через исполнительный механизм 16 с помощью заслонки 17 регулирует расход воды на вход гранулятора 1. Система контроля расхода воздуха обеспечивает подачу такого количества воды на гранулятор 1, при котором достигается максимальная газопроницаемость слоя окатышей, определяемого по оптимальному расходу воздуха через вакуум-камеру 9 при стабильном разрежении в ней. Окатыши с максимальной газопроницаемостью после зоны подогрева и сушки, движутся по обжиговой машине через зоны обжига и охлаждения, в которых происходит спекание и упрочнение окатышей. Качественный готовый продукт после обжиговой машины выгружается на грохот 2. Устройство для подготовки шихты в производстве титановых окатышей позволит быстро отрегулировать газопроницаемость слоя даже при изменении состава шихты, что значительно повысит качество окатышей на выходе из обжиговой машины и снизит количество продукта, направляемого в оборот.

Данное устройство по сравнению с существующими установками позволит упростить управление процессом обжига, повысит качество готового продукта за счет оперативного управления элементами устройства и оптимизации газопроницаемости слоя шихты [139].

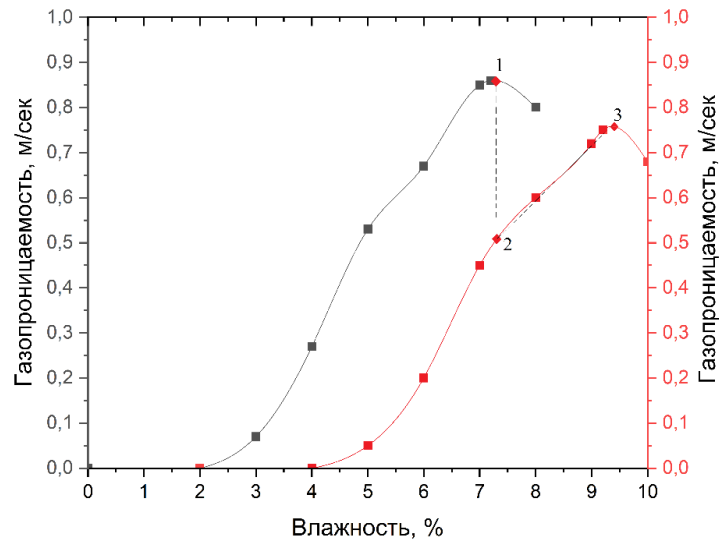


Рис. 4.7. Схема поиска оптимальной газопроницаемости слоя шихты при изменяющихся условиях работы обжиговой машины

Работа системы проиллюстрируем следующим образом. Рассмотрим наихудшие условия работы системы. Предположим, что в какой-то момент времени газопроницаемость шихты скачком изменилась следующим образом (рисунок 4.7.). Это возможно, например, при переключении загрузки шихты из другого бункера с более мелким гранулометрическим составом шихты. При этом как показано на рисунке, газопроницаемость шихты уменьшится. Условия работы машины из точки 1 переместится в точку 2, что резко ухудшит все характеристики процесса.

Однако экстремального регулятор воздействия на расход воды в гранулятор найдет новое значение максимальной газопроницаемости, точка 3 на графике. Таким образом, при изменяющихся характеристиках шихты процесс непрерывно будет вестись максимально возможно оптимальном режиме при изменяющихся условиях производства окатышей.

#### 4.4 Выводы по четвертой главе

1. Получены математические модели в виде уравнения регрессии, описывающие оптимальные значения влажности и газодинамических параметров шихты.

2. Установлено, что максимальная газопроницаемость шихты достигается при значении влажности – 7,333 %.

3. Получены экстремумы основных технологических параметров процесса сушки окатышей, таких как насыпная масса, усадка слоя, скорость перемещения зоны сушки, что позволяют сделать вывод о возможности оптимизации процесса сушки титановых окатышей.

4. Предложено устройство для производства титановых окатышей. Устройство позволяет оптимизировать управление процессом обжига, повысит качество готового продукта за счет оперативного управления технологическим режимом обжиговой машины. Устройство защищено патентом РФ №2 791 307.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований были получены следующие результаты:

1. Проанализировано современное состояние технологии получения окатышей в титановом производстве, определена актуальность работы и направление дальнейшего исследования. Установлено, что совершенствование оборудования, которое используется в технологическом процессе с целью получения продукции необходимого качества, достигается путем математического моделирования и оптимизации основных параметров производства.

2. Выполнен анализ физико-химических показателей процесса формирования титановых окатышей при взаимодействии в шихту органического связующего вещества сульфитно-спиртовой барды. В результате получены уравнения, описывающие массу и количество окатышей, которые имеют определенную геометрическую характеристику  $i$ -ой зоны окомкователя в зависимости от момента времени.

3. Разработана математическая модель процесса сушки титановых окатышей в обжиговой конвейерной машине с учетом оптимальных параметров перераспределения влаги и теплообмена, которые предотвращают негативные влияния на процесс.

4. Разработана математическая модель карботермического восстановления ильменитового концентрата с учетом использования железотитанистых руд, которая позволяет улучшить сортность металла с извлечением примесей, а также в целях очистки продукта и исследовать дальнейший передел производства титана.

5. Разработана математическая модель процесса теплопередачи при рекуперации нагретого воздуха в стационарных условиях. Проведены статические и динамические решения разработанной модели с применением итерационных

алгоритмов поиска корней в пакете программ Mathcad. Полученные решения представлены в виде уравнений.

6. Разработана математическая модель в виде уравнения регрессии, связывающие значения влажности и газопроницаемости шихты. Оптимальная влажность составляет 7,333 % при достижении максимальной газопроницаемости шихты. Получены экстремумы основных технологических параметров процесса сушки окатышей, таких как насыпная масса, усадка слоя, скорость перемещения зоны сушки, что позволяют сделать вывод о возможности оптимизации процесса сушки титановых окатышей.

7. Разработано устройство для производства титановых окатышей. Устройство контролирует газопроницаемость шихты. Защищено Патентом РФ №2971307.



**СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

1. Sibum H. Titanium and titanium alloys – From raw material to semi-finished products / H. Sibum // *Adv. Eng. Mater.* – 2003. – V. 5. – P. 393-398.
2. Leyens C. Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications / C. Leyens, M. Peters. – NJ: John Wiley & Sons, Hoboken, 2003. – 532 p.
3. Cui C. Titanium alloy production technology, market prospects and industry development / C. Cui, B. Hu, L. Zhao, S. Liu // *Mater. Des.* – 2011. – V. 32. – P. 1684-1691.
4. Mutava T.D. Characterisation of a Titanium Precursor Salt and Study of Some of the Treatment Steps Used for the Extraction Process: PhD Thesis / Tapiwa David Mutava. – Johannesburg: University of the Witwatersrand, 2009. – 135 p.
5. Тигунов Л.П. Титановые руды России: состояние и перспективы освоения / Л.П. Тигунов, Л.З. Быховский, Л.Б. Зубков. – М.: ВИМС, 2005. – 104 с.
6. Резниченко В.А. Титаномагнетиты. Месторождения, металлургия, химическая технология / В.А. Резниченко, Л.И. Шабалин. – М.: Наука, 1986. – 294 с.
7. Николаева О.А. Современное состояние и потенциальные возможности развития титановой индустрии в России / Институт экономических проблем Кольского НЦ РАН, г. Апатиты.
8. Требухов С.А. Перспективы развития титанового производства в Казахстане / С.А. Требухов, К.Ш. Ахметова, А.В. Ниценко, Ф.Х. Тулеутай, Н.М. Бурабаева // *Материалы Международной научно-практической конференции Эффективные технологии производства цветных, редких и благородных металлов*, Алматы 2018. С. 159-163.
9. Александров А.В. Состояние дел в титановой отрасли и перспективы развития / А.В. Александров, С.В. Леднов, Е.А. Давыдкина // *Технология легких сплавов*. №2. 2021.

10. Christie T. Mineral Commodity Report 16 – Titanium / Tony Christie and Bob Brathwaite // Institute of Geological and Nuclear sciences Ltd.
11. U.S. Geological Survey. Mineral Commodity Summaries 2021. – VA, USA, U.S. Geological Survey: Reston, 2021. – 200 p.
12. Bessinger D. The decrepitation of solidified high titania slags / D. Bessinger, J.M.A. Geldenhuis, P.C. Pistorius, A. Mulaba, G. Hearne // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2001. – V. 282. – P. 132-142.
13. Fang Z.Z. Powder metallurgy of titanium – Past, present, and future / Z.Z. Fang, J.D. Paramore, P. Sun, K.R. Chandran, Y. Zhang, Y. Xia, M. Free // Int. Mater. Rev. – 2018. – V. 63. – P. 407-459.
14. Kroll W. The production of ductile titanium / W. Kroll // Trans. Electrochem. Soc. – 1940. – V. 78. – P. 35-47.
15. Hunter M. Metallic titanium / M. Hunter // J. Am. Chem. Soc. – 1910. – V. 32. – P. 330-336.
16. Adams R. The world market for TiO<sub>2</sub> feedstocks / R. Adams // Minerals Industry International. – January 1994. – P. 9-14.
17. Павловец В.М. Развитие техники и технологии окомкования железорудного сырья в металлургии: монография / В.М. Павловец. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. – 336 с.
18. Кудрявцев В.С. Окатывание железо-титановых концентратов / В.С. Кудрявцев, В.А. Резниченко, В.И. Соловьев, Н.М. Цалапова // Проблемы металлургии титана. – 1967. – С. 28-31.
19. Резниченко В.А. Цветная металлургия Бюл. НТИ. – 1976. – №1. – С. 27-28.
20. Резниченко В.А. Электротермия титановых руд / В.А. Резниченко. – М.: Наука, 1969. – 207 с.
21. Morrissey J.P. Discrete Element Modelling of Iron Ore Pellets to Include the Effects of Moisture and Fines / John Paul Morrissey // PhD thesis University of Edinburgh, 2013. – 331 p.

22. Берман Ю.А. Основные закономерности производства окатышей / Ю. А. Берман. – Челябинск: Metallurgy, 1991. – 183 с.
23. Першуков А.А. Справочник рабочего фабрики окомкования / А.А. Першуков, А.В. Соболев. Челябинск: Metallurgy, 1988. – 240 с.
24. Пат. №2347824 Российская Федерация, МПК С 22 В 1/14. Шихта для производства окатышей из титаномагнетитовых концентратов / Горбачев В.А., Евстюгин С.Н., Рыбкин В.С., Леушин В.Н., Шаврин С.В., Чесноков Ю.А., Филиппов В.В., Киричков А.А. (RU) ; заявитель и патентообладатель ООО «Научно-производственное внедренческое предприятие ТОРЭКС». – №2007134452/02 ; заявл. 17.09.2007 ; опубл. 27.02.2009, Бюл. № 6.
25. Пат. №1323597 СССР, МПК С 22 В 1/14. Способ подготовки шихты для производства офлюсованных железорудных окатышей / Федоров О.Г., Плискановский С.Т., Панчошный Н.М., Бойко В.Н., Петровский А.В., Исполатов В.Б., Каменный В.Л., Буланкин Н.И., Тыква П.Я., Гегельский А.И., Соломаха В.Н. ; заявитель и патентообладатель Днепропетровский металлургический институт им. Л.И. Брежнева. – №4026894/22-02 ; заявл. 25.11.1985 ; опубл. 15.07.1987, Бюл. №26.
26. Пат. №1747518 СССР, МПК С 22 В 1/243. Шихта для производства окатышей / Бадагов В.Ф., Лобода В.И., Хватов Ю.А., Маймур В.П., Белоножко А.Н., Ульянов А.Г., Гладков Н.А., Крипак С.Н., Рудовский Б.Г., Давидюк А.А., Цикалова Л.А. ; заявитель и патентообладатель Институт черной металлургии. – №4807109/02 ; заявл. 16.01.1990 ; опубл. 15.07.1992, Бюл. №26.
27. Коротич В.И. Теоретические основы окомкования железорудных материалов / В.И. Коротич. – М.: Metallurgy, 1966. – 251 с.
28. Zhu D. Iron ore pelletization in Iron Ore: Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability / D. Zhu, J. Pan, L. Lu and R.J. Holmes // Woodhead Publishing. – 2015. – P. 435-473.
29. Poveromo J. Future Trends in Ironmaking / J. Poveromo // Prepared for McMaster Blast Furnace Ironmaking Course. – 2014. – May 11-16.

30. Abazarpour A. Investigation of iron ore particle size and shape on green pellet quality / A. Abazarpour, M. Halali, R. Hejazi, M. Saghaeian and V. S. Zadeh // Canadian Metallurgical Quarterly. – 2020. – V. 59. – № 2. – P. 242-250.
31. Patra S. The effect of particle size on green pellet properties of iron ore fines / S. Patra, A. Kumar and V. Rayasam // Journal of Mining and Metallurgy A: Mining. – 2017. – V. 53A. – №1. – P. 31-41.
32. Umadevi T. Influence of raw material particle size on quality of pellets / T. Umadevi, M.G.S. Kumar, S. Kumar, C.S.G. Prasad and M. Ranjan // Ironmaking and Steelmaking. – 2008. – V. 35. – № 5, P. 327-337.
33. Meyer K. Pelletizing of Iron Ores / K. Meyer. – Berlin, New-York: Springer-Verlag, 1980. – 302 p.
34. Ball D.F. Agglomeration of Iron Ores / D.F. Ball, J. Dartnell, J. Davison, A. Grieve, R. Wild. – New-York: American Elsevier Publishing Company, 1973. – 388 p.
35. Fu J. Sintering and pelletizing / J. Fu, T. Jiang and D. Zhu. – Changsha: Press of Central South University of Technology, 1995. – 282 p.
36. Pal J. Innovative Development on Agglomeration of Iron Ore Fines and Iron Oxide Wastes / J. Pal // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. – 2019. – V. 40. – № 4. – P. 248-264.
37. Halt J.A. Review of Organic Binders for Iron Ore Concentrate Agglomeration / J.A. Halt and S.K. Kawatra // Minerals and Metallurgical Processing. – 2014. – V. 31. – № 2. – P. 73-94.
38. Srivastava U. Study of Organic and Inorganic Binders on Strength of Iron Oxide Pellets / U. Srivastava, S.K. Kawatra and T.C. Eisele // Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science. – 2013. – V. 44. – № 4. – P. 1000-1009.
39. Sivrikaya O. Thermal Investigation of Some Potential Binders for Iron Ore Pelletizing / O. Sivrikaya and A.I. Arol // In 16th International Mineral Processing Symposium (IMPS 2018). – 2018. – P. 550-557.

40. Moraes S.L. Laboratory study of an organic binder for pelletization of a magnetite concentrate / S.L. de Moraes and S.K. Kawatra // Minerals and Metallurgical Processing. – 2010. – V. 27. – № 3. – P. 148-151.
41. Sivrikaya O. The effect of calcined colemanite addition on the mechanical strength of magnetite pellets produced with organic binders / O. Sivrikaya, A.I. Arol, T. Eisele and S.K. Kawatra // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. – 2013. – V. 34. – № 4. – P. 210-222.
42. McAdam G.D. Direct gas reduction of NZ Ironsands / G.D. McAdam, R.E.A. Dall and T. Marshall // New Zealand Journal of Science. – 1969. – V. 12. – № 4. – P. 649-668.
43. Shaw G. Indias Kudremukh Iron Ore Project / G. Shaw // Skilling Mining Review. – 1983. – V. 72. – №44. – P. 4-11.
44. Chung G. Advances in Iron Ore Pelletizing at Carol Pellet Plant / G. Chung // Skilling Mining Review. – 1985. – V. 74. – №37. – P. 6-12.
45. Patent №3 868 246 US. Pellet production process / Karl Heinz Boss ; Assignee Dravo Corporation, Pittsburgh, Pa. – №403 919 ; filed 05.10.1973 ; publ. 25.02.1975.
46. Пат. №2652684 Российская Федерация, СПК F 27 В 21/06, С 22 В 1/14. Способ и устройство для производства окатышей / Евстюгин С.Н., Брагин В.В., Солодухин А.А., Боковиков Б.А., Клейн В.И., Борисенко Б.И., Пузаков П. В., Кретов С.И., Стародумов А.В. (RU) ; заявитель и патентообладатель ООО «Научно-производственное внедренческое предприятие ТОРЭКС». – №2017107861 ; заявл. 10.03.2017 ; опубл. 28.04.2018, Бюл. № 13.
47. Moraes S. Iron Ore Pelletizing Process: An Overview, Iron Ores and Iron Oxide Materials. Chapter 3 / S. Moraes, J. Lima, T.R. Ribeiro. – London: IntechOpen, 2018. – 280 p.
48. Prusti P. Study of Temperature Profile in the Induration of Magnetite Iron Ore Pellets / P. Prusti, B.K. Nayak and S.K. Biswal // Transactions of the Indian Institute of Metals. – 2017. – V. 70. – № 2. – P. 453-462.

49. Huang Z. Mechanisms of strength decrease in the initial reduction of iron ore oxide pellets / Z. Huang, L. Yi, and T. Jiang // Powder Technology. – 2012. – V. 221. – P. 284-291.

50. Абзалов В.М. Тепловая работа обжиговых конвейерных машин / В.М. Абзалов, С.Н. Евстюгин, В.И. Клейн. – Екатеринбург: УрО РАН, 2012. – 248 с.

51. Пат. 2350664 РФ, МПК С 22 В 1/20. Способ трехстадийной сушки окатышей на обжиговой конвейерной машине / Абзалов В.М., Евстюгин С.Н., Клейн В.И., Неволин В.Н., Солодухин А.А. ; патентообладатель ООО «Научно-производственное внедренческое предприятие ТОРЭКС». – №2007133461/02 ; заявл. 06.09.2007 ; опубл. 27.03.2009, Бюл. № 9.

52. Пат. 2149331 РФ, МПК F 27 В 21/06, С 22 В 1/20. Установка для получения окатышей / Майзель Г.М., Белоцерковский Я.Л., Абзалов В.М. и др. ; заявитель и патентообладатель Сименс Акциенгезелльшафт (DE), НПВП "ТОРЭКС" (RU). – №97118429/02 ; заявл. 20.03.1996 ; опубл. 20.05.2000.

53. Боковиков Б.А. Универсальная математическая модель тепломассообмена в слое при обжиге окатышей на конвейерной машине / Б.А. Боковиков, В.М. Малкин, Г.М. Майзель, В.В. Брагин // Сталь. – 2002. – № 4. – С. 29-34.

54. Боковиков Б.А. Теплофизические закономерности термообработки железорудных окатышей на конвейерной машине (математическое моделирование) / Б.А. Боковиков, В.В. Брагин, С.Н. Евстюгин. – Екатеринбург: ООО «НПВП ТОРЭКС», 2013. – 200 с.

55. Pelletizing [Electronic resource] // Haver&Boecker Niagara [website]. – Режим доступа: <https://haverniagara.de/pelletizing.html>.

56. Nomura T. Beneficiation Plants and Pelletizing Plants for Utilizing Low Grade Iron Ore / T. Nomura, N. Yamamoto, T. Fujii, Y. Takiguchi // Kobelco Technology Review. – 2015. – № 33. – P. 8-15.

57. Павлова А.Н. Математическое моделирование и оптимизация технологических процессов / А.Н. Павлова, О.В. Кузнецова // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. – 2021. – №1 (65). – С. 78-87.

58. Коршиков Г. В. Физическая модель процесса окускования и кинетики грануляции шихты в цилиндрическом барабане / Г.В. Коршиков // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1977. – № 4. – С. 26-30.
59. Kalanadh V.S. Кинетика роста сырых гранул под действием механизма наслоения / V.S. Kalanadh, Duglas Sastry, W. Fuerstenau. –Transaction Society of Mining. Eng., AITME. – 1977. – Vol.262. – 43 с.
60. Сулименко Е.М. Производство окатышей / Е.М. Сулименко. – М.: Металлургия, 1988. – 129 с.
61. Bhrany U.N. Entwurf und Betrieb von Pelletiertellern / U.N. Bhrany // Aufbereitung-Technik. – 1977. – Vol. 12. – S. 641-647.
62. Трофимов А.В. К вопросу определения толщины скатывающегося слоя сыпучего материала во вращающемся барабане / А.В. Трофимов, М.П. Макевнин, Л.В. Суркова // Труды МИХМ. – 1973. – Вып. 49. – С. 10-12.
63. Ищенко А.Д. Статические и динамические свойства агломерационного процесса / А.Д. Ищенко. – М.: Металлургия, 1972. – 320 с.
64. Huang D.D. Drying process of iron ore pellets and its mathematical model / D.D. Huang, L. Kong, Z. Lin // Acta metallurgica Sinica. Series B, Process metallurgy & miscellaneous. – 1993. – V. 6. – P. 227-234.
65. Tsukerman T.T. On the drying rates of individual iron oxide pellets / T.T. Tsukerman, C. Duchesne, D. Hodouin // International journal of mineral processing. – 2007. – V. 83. – P. 99-115.
66. Брагин В.В. Классическая «задача Шумана» для теплообмена в неподвижном слое и тепловая работа слоя на конвейерной обжиговой машине / В.В. Брагин, Б.А. Боковиков // Творческое наследие В.Е. Грум-Гржимайло: история, современное состояние, будущее: Сборник докладов международной научно-практической конференции, посвященной 150-летию со дня рождения великого русского ученого-металлурга Владимира Ефимовича Грум-Гржимайло, Екатеринбург, 27-29 марта 2014 года. Том Часть 1. – Екатеринбург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего

профессионального образования Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2014. – С. 104-110.

67. Бобков В.И. Особенности расчёта теплоэнергетического баланса для обжиговой конвейерной машины / В.И. Бобков, М.И. Дли // Изв. Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). – 2021. – № 58(84). – С. 70-76.

68. Pistorius P.C. Physicochemical aspects of titanium slag production and solidification / P.C. Pistorius and C. Coetzee // Metallurgical and Materials Transactions B. – 2003. – V. 34 (5). – P. 581-588.

69. Han K. Study on granulation of fine grained ilmenite concentrate / K. Han // Panzhihua Sci&Tech Information. – 2011. – V. 36(4). – P. 52-56.

70. Timofeeva A.S. Optimizing the granulometric composition of pellets obtained on a disc pelletizer / A.S. Timofeeva, T.V. Nikitchenko, A.L. Rogova // Metallurgist. – 2013. – №5-6. – P. 402-407.

71. Кривоносов В.А. Математическая модель процесса обжига окатышей по зонам обжиговой машины для оптимизации режима / В.А. Кривоносов, Д.С. Пирматов // Вестник ВГТУ. – 2010. – №5. – С. 128-132.

72. Haas L.A. Effectiveness of organic binders for iron ore pelletization. Report of Investigations / L.A. Haas, J.A. Aldinger, J.C. Nigro. – U.S. Bureau of Mines, RI 9230, 1989. – 25 p.

73. Chellan R. Direct reduction of mixed magnetite and coal pellets using induction heating / R. Chellan, J. Pocock, D. Arnold // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. – 2010. – V. 26(1). – P. 63-76.

74. Patent №5 171 361 US. Modified native starch bas binder for pelletizing mineral material / Dingeman, D.L., Skagerberg, W.E. ; Oriox Technologies, Inc., Duluth, Minn. – №592 913 ; filed 04.10.1990 ; publ. 15.12.1992.

75. Majerčák S. Peletizácia jemnozrnných materiálov / S. Majercak. – Bratislava: Alfa vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatary, 1976. – 232 p.

76. Фролов Ю.А. Научно-техническое обоснование модернизации агломерационной фабрики ОАО "ЧМК" с охлаждением спека на



агломерационных машинах / Ю. А. Фролов, Л. И. Полоцкий, А. Г. Птичников и др. // Бюллетень Черметинформации. 2010. №1. С. 9-11.

77. Павловец В.М. Окатыши в технологии экстракции металлов из руд: учеб. пособие / В.М. Павловец. – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2014. – 345 с.

78. Витюгин В.М. Обеззоливание концентратов сульфитно-спиртовой барды / В.М. Витюгин, Е.С. Плотникова // Известия ТПУ. – 1964. – С. 102-105.

79. Журавлев Ф.М. Совершенствование технологии производства окатышей и нового железорудного сырья для современной доменной плавки: в 2 т. Т. 1: Теория, технология и оборудование подготовки шихт и их окомкования в производстве окатышей / Ф.М. Журавлев, В.П. Лялюк, Н.И. Ступник и др. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2020. – 332 с.

80. Komiyama K.M. Numerical analysis of titanium compounds in blast furnace hearth during titania addition / K.M. Komiyama, B.Y. Guo, H. Zoughbi // Steel Research International. – 2014. – № 6. – P. 592-603.

81. Рутковский А.Л. Моделирование процесса формирования титановых окатышей в барабанном окомкователе / А.Л. Рутковский, Э.М. Бахтеев, Х.А. Бутов // Вестник ГГНТУ. Технические науки. – 2023. – № 2 – С. .

82. Брагин В.В. Исследование двухслойной сушки железорудных окатышей / В.В. Брагин, С.И. Поколенко, А.Ю. Поколенко, Н.А. Спирин // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве: сборник докладов VIII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных (ТИМ 2019) с международным участием, Екатеринбург, 16-17 мая 2019 г. – С. 19-24.

83. Кривоносов В.А. Поиск параметров оптимального режима обжига окатышей в конвейерной обжиговой машине / В.А. Кривоносов, Д.С. Пирматов // Технические науки. Автоматизированные системы управления на производстве – 2014.

84. Forsmo S. Influence of green pellet properties on pelletizing of magnetite iron ore: Doctoral Thesis / Seija Pirkko Elina Forsmo. – Luleå: Luleå University of Technology, 2007. – 235 p.

85. Clark K.N. Iron ore pellet drying mechanisms under the heating conditions encountered in a straight-grate indurator / K.N. Clark // Transactions. Section C-Mineral processing & extractive metallurgy. – 1981. – V. 90. – P. 66-72.

86. Боковиков Б.А. Теплофизические основы создания тепловой схемы обжиговой машины нового поколения / Б.А. Боковиков, В.В. Брагин, А.А. Солодухин, В.С. Швыдкий, Ю.Г. Ярошенко // Современные научные достижения металлургической теплотехники и их реализация в промышленности: сборник докладов II Международной научно-практической конференции (Екатеринбург, 18-21 сентября 2017 г.) – Екатеринбург: УрФУ, 2018. – С. 26-33.

87. Dartnell J. Effect of Burden Productivity and efficiency / J. Dartnell // J. of the Iron and Steel Inst. – 1969. – Vol. 27, No. 3. – P. 282-293.

88. Кривонос В.А. Оптимизация режима термообработки окатышей в АСУ ТП конвейерной обжиговой машины / В.А. Кривонос, Д.С. Пирматов // Инженерный вестник Дона. – 2013. – № 3. – С. 19-25.

89. Лобова К.В. Моделирование влияния термической обработки на массу окатышей по технологическим зонам обжиговой машины / К.В. Лобова // Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2017. – № 35. – С. 230-236.

90. Korthas V. Hearth protection in blast furnace operation by injection of  $TiO_2$  materials / V. Korthas, I. Hunger, V. Pschebezin et al. – Luxembourg: Technical Steel Research Series, European Commission, 2007. – 140 p.

91. Юрьев Б.П. Изучение теплофизических свойств титаномагнетитовых качканарских окатышей / Б.П. Юрьев, В.А. Гольцев // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2016. – Т. 59, № 5. – С. 328-333.

92. Kapelyushin Y.E. Beneficiation of vanadium and titanium oxides by using selective extraction of iron in low-titanium magnetite concentrate / Y.E. Kapelyushin, V.E. Roshchin, A.V. Roshchin // Solid State Phenomena. – 2017. – Vol. 265. – P. 913-918.

93. Gamov P.A. Thermodynamic modelling of the metals' reduction process from the Suroyam titanomagnetite concentrate / P.A. Gamov, N.V. Mal'kov, V.E.

Roshchin // Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy. – 2018. – Vol. 18, No. 2. – P. 21-28.

94. Seplyarskii B.S. A study of the characteristics of the combustion of  $Ti + xC$  ( $x > 0.5$ ) powder and granular compositions in a gas coflow / B.S. Seplyarskii, R.A. Kochetkov // Russian Journal of Physical Chemistry B. – 2017. – Vol. 11, Iss. 2. – P. 793-807.

95. Лебедев П.Д. Расчет и проектирование сушильных установок / П.Д. Лебедев. – М.: Metallurgy, 1964. – 220 с.

96. Лыков М.В. Сушка в химической промышленности / М.В. Лыков. – М.: Энергия, 1966. – 320 с.

97. Пасконов В.М. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена / В.М. Пасконов, В.И. Полежаев, Л.А. Чудов. – М.: Наука, 1984. – 286 с.

98. Арутюнов В.А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей / В.А. Арутюнов, В.В. Бухмиров, С.А. Крупенников. – М.: Metallurgy, 1990. – 239 с.

99. Panchenko S.V. Thermal hydraulics of moving dispersive layer of process units / S.V. Panchenko, T.V. Shirokikh // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2016. – Vol. 50, No. 2. – P. 217-224.

100. Bobkov V.I. Approach to a heat conductivity research by fuzzy numerical methods in the conditions of indeterminacy thermal characteristics / V.I. Bobkov, V.V. Borisov, M.I. Dli // Systems of Control, Communication and Security. – 2017. – No. 3. – P. 73-83.

101. Bazhin V.Yu. Specificity of the titanium-powder alloying tablets usage in aluminium alloys / V.Yu. Bazhin, S.A. Savchenkov, Yu.I. Kosov // Non-ferrous Metals. – 2016. – Vol. 2. – P. 52-56.

102. Low J. Surface modification and enhanced photocatalytic  $CO_2$  reduction performance of  $TiO_2$ : a review / J. Low, B. Cheng, J. Yu // Applied Surface Science. – 2017. – P. 658-686.

103. Zhang J. Preparation of graphite nanosheets in different solvents by sand milling and their enhancement on tribological properties of lithium-based grease / J. Zhang, A. Wang, H. Yin // Chinese Journal of Chemical Engineering. – 2020. – Vol. 28, Iss. 4. – P. 1177-1186.

104. Elgharbi S. Investigation of the structural and mineralogical changes of Tunisian phosphorite during calcinations / S. Elgharbi, K. Horchani-Naifer, M. Férid // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2015. – Vol. 119, No. 1. – P. 265-269.

105. Кусков В.Б. Обогащение и переработка полезных ископаемых: учеб. пособие / В.Б. Кусков, М.В. Никитин. – СПб.: Санкт-Петербургский горный институт, 2002. – 84 с.

106. Рутковский А.Л. Оптимизации режима технологического процесса сушки титановых окатышей в агрегате туннельного типа / А.Л. Рутковский, З.Г. Салихов, М.А. Ковалева, Э.М. Бахтеев // Цветные металлы. – 2021. – №5. – С. 89-94.

107. Катков О.М. Поведение металлов-примесей при выплавке кремния из кварцита в дуговой электропечи / О.М. Катков // Изв. вузов. Цветная металлургия. – 1993. – №3-4. – С. 37-40.

108. Лapidус А.Л. Реакции Белла Будуара и водяного газа в условиях синтеза Фишера-Тропша / А.Л. Лapidус, О.Л. Елисеев и М.В. Крючков // Химия твердого топлива. – 2011. – № 5. – С. 26-28.

109. Погорелый А.Д. Теория металлургических процессов / А.Д. Погорелый. – М.: Металлургия, 1971. – 504 с.

110. Жуховицкий А.А. Физическая химия / А.А. Жуховицкий и Л.А. Шварцман. – М.: Металлургия, 1968. – 520 с.

111. Эберт К. Компьютеры. Применение в химии / К. Эберт и Х. Эдерер. – М.: Мир, 1988. – 416 с.

112. Зароченцев В.М. Моделирование процесса карботермического восстановления оксида металла с помощью итерационного алгоритма в системе Mathcad / В.М. Зароченцев, А.Л. Рутковский, А.К. Макоева, Э.М. Бахтеев // Современные научно-технические и социально-гуманитарные исследования:

актуальные вопросы, достижения и инновации: Сборник докладов II Всероссийской научно-практической конференции – Владикавказ: Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), 2021. – С. 77-81.

113. Давидсон А.М. Об эффективности применения подогретого воздуха для отражательной медной плавки / А.М. Давидсон // Изв. высших учеб. заведений: Цветная металлургия. – №5. – 1961. – С. 152-155.

114. Батунер Л.А. Математические методы в химической технике / Л.А. Батунер, М.Е. Позин. – Л.: Химия, 1971. – 824 с.

115. Исаченко В.П. Теплопередача: учебник для технических специальностей высших учебных заведений / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – М.: Энергоиздат, 1981. – 415 с.

116. Осипова В.А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена: учебное пособие / В.А. Осипова. – М.: Энергия, 1969. – 392 с.

117. Пат. №2618454 РФ, МПК G09B 23/16. Лабораторная установка для исследования и моделирования теплообмена в теплоутилизационных аппаратах / Т.Е. Герасименко, В.М. Зароченцев, Е.И. Мешков (Россия). – №2016109724 ; заявл. 17.03.2016 ; опубл. 03.05.2017, Бюл. № 13, 17.03.2016 (Россия). – 10 с. : ил.

118. Пашинский В.А. Методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Теплопередача» / сост. В.А. Пашинский, М.Л. Левин, А.А. Антух. – Минск: МГЭУ им. А.Д. Сахарова, 2012. – 52 с.

119. Дудников Е.Г. Построение математических моделей химико-технологических объектов / Е.Г. Дудников, В.С. Балакирев, В.Н. Кривосунов, А.М. Цирлин. – Л.: Химия, 1970. – 312 с.

120. Зароченцев В.М. Применение численных методов для автоматизированного расчета процесса рекуперации тепловой энергии воздуха / В.М. Зароченцев, И.И. Болотаева, М.А. Ковалева // Технические науки – от теории к практике: Сборник статей по материалам LIII международной науч. – практ. конф. №12(48). Новосибирск. Изд. АНС «СибАК», 2015. С. 97-105.

121. Очков В.Ф. Теплотехнические этюды с Excel, Mathcad и Интернет / В.Ф. Очков. – СПб.: БХВ-Петербург, 2014. – 336 с.

122. Рутковский А.Л. Некоторые особенности моделирования процесса теплообмена при рекуперации нагретого воздуха / А.Л. Рутковский, В.М. Зароченцев, Э.М. Бахтеев, И.И. Болотаева // Современные тенденции развития информационных технологий в научных исследованиях и прикладных областях: Сборник докладов I Международной научно-практической конференции – Владикавказ: Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), 2020. – С. 73-78.

123. Арунянц Г.Г. Оценка и корректировка параметров математических моделей при адаптивном управлении нестационарными технологическими процессами / Г.Г. Арунянц, А.Л. Рутковский, Э.К. Алборов, Д.В. Сидоров, А.А. Диденко // Изв. вузов. Сев.-Кавк. Регион. Техн. Науки. – 2004. – Спецвыпуск. – С. 47-50.

124. Агеев Н.Г. Моделирование процессов и объектов в металлургии: уч. пособие / Н.Г. Агеев. – Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2016. – 108 с.

125. Deepak N. An Optimal Route for the Preparation of Metallized Composite Pellets from Ilmenite Concentrate / N. Deepak, R. Nigamananda, D. Nilima, S.R. Swagat, P. Soobhankar, S.De. Partha // Journal of Sustainable Metallurgy. – 2021. – № 7. – P. 1102-1115.

126. Алешин Е.А. Математическая модель зависимости газопроницаемости шихты от ее влажности в процессе производства агломерата / Е.А. Алешин // Вестник ЮУрГУ. – 2010. – № 2. – С. 37-40.

127. Коротич В.И. Газодинамика агломерационного процесса / В.И. Коротич и В.П. Пузанов. – М.: Издательство «Металлургия», 1969. – 208 с.

128. Нурадинов А.С. Математическое моделирование процессов формирования литых заготовок при непрерывной разливке стали / А.С. Нурадинов, Н.С. Уздиева, Э.М. Балатханова, А.Н. Тепсаев // Вестник ГГНТУ. Технические науки. – 2019. – Том XV. – №2(16). – С. 56-66.

129. Вегман Е.Ф. Теория и технология агломерации / Е.Ф. Вегман. – М.: Металлургия, 1974. – 208 с.

130. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул / Е.Н. Львовский. – М.: Высшая школа, 1988. – 239 с.

131. Кирьянов Д.В. Mathcad 14 / Д.В. Кирьянов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2007. – 704 с.

132. Рутковский А.Л. Моделирование газодинамических параметров шихты в процессе получения титановых окатышей с целью оптимизации / А.Л. Рутковский, Э.М. Бахтеев, А.К. Макоева, Х.А. Бутов // Вестник ГГНТУ. Технические науки. – 2022. – Т. 18. – № 2 (28). – С. 63-71.

133. Рутковский А.Л. Исследование оптимальных режимов процесса формирования титановых окатышей / А.Л. Рутковский, Э.М. Бахтеев, А.М. Ачилов // Современные тенденции развития информационных технологий в научных исследованиях и прикладных областях: Сборник докладов III Международной научно-практической конференции – Владикавказ: СКГМИ. – 28-29 апреля 2022 г. – С. 78-83.

134. Рутковский А.Л. Оптимизация режима процесса формирования титановых окатышей / А.Л. Рутковский, Э.М. Бахтеев, Х.А. Бутов, А.М. Ачилов // Современные научно-технические и социально-гуманитарные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации: Сборник докладов IV Всероссийской научно-практической конференции. – Владикавказ: СКГМИ (ГТУ). – 2022. – С. 48-52.

135. Рутковский А.Л. Разработка системы контроля газопроницаемости шихты в производстве титановых окатышей / А.Л. Рутковский, Э.М. Бахтеев // Труды Северо-Кавказского горно-металлургического института (государственного технологического университета). – Владикавказ, 2022. – Вып. 29. – С. 19-22.

136. Bakhteev E.M. Optimization of the charge preparation process in the production of titanium pellets / E.M. Bakhteev, A.L. Rutkovskiy, H.A. Butov // Colloquium-journal. – 2022. – № 30(153). – P. 15-19.

137. Рутковский А.Л. Исследование процесса подготовки шихты в производстве титановых окатышей с целью оптимизации / А.Л. Рутковский, Э.М. Бахтеев, Х.А. Бутов // WORLD SCIENCE: PROBLEMS AND INNOVATIONS: сборник статей LXIX Международной научно-практической конференции. – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение». – 2022. – С. 66-71.

138. Рутковский А.Л. Устройство для оптимизации подготовки шихты в производстве титановых окатышей / А.Л. Рутковский, Э.М. Бахтеев, М.Э. Багаева, А.К. Макоева // Современные научно-технические и социально-гуманитарные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации: Сборник докладов IV Всероссийской научно-практической конференции. – Владикавказ: СКГМИ (ГТУ). – 2022. – С. 52-56.

139. Пат. №2791307 РФ, МПК С 22 В 1/16, F 27 В 21/06, G 01 N 15/08. Устройство для производства титановых окатышей / Рутковский А.Л., Бахтеев Э.М. ; патентообладатель ФГБОУ Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет). –№2022109054 ; заявл. 06.04.2022 ; опубл. 07.03.2023, Бюл. № 7.