

*На правах рукописи*

**Бахтеев Эркин Маратович**

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

Специальность

2.6.2 – «Металлургия черных, цветных и редких металлов»

**Автореферат**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Владикавказ 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)» на кафедре «Металлургия цветных металлов и автоматизация металлургических процессов»

Научный руководитель: **Рутковский Александр Леонидович**  
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Павлов Александр Васильевич**  
доктор технических наук, профессор кафедры металлургии стали, новых производственных технологий и защиты металлов ФГАОУ ВО Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

**Ахтаев Салман Сайд-Селимович**  
кандидат технических наук, доцент кафедры «Физика» Грозненского государственного нефтяного технического университета им. М.Д. Миллионщикова

Ведущая организация – Научно-исследовательский институт металлургической теплотехники (ОАО «ВНИИМТ»)

Защита диссертации состоится «\_\_\_» сентября 2023 года в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.2.397.01 (Д 212.246.05), созданного на базе Северо-Кавказского горно-металлургического института (государственного технологического университета), по адресу: 362021, РСО – Алания, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44, факс 8(8672)40-72-03, E-mail: info@skgmigtu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Северо-Кавказского горно-металлургического института (государственного технологического университета) [www.skgmi-gtu.ru](http://www.skgmi-gtu.ru).

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета,  
доктор технических наук, профессор

В.Н. Хетагуров

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**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.

**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.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить **следующие задачи:**

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.

**Научная новизна** работы заключается в следующих результатах:

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. Разработан новый способ контроля газопроницаемости шихты и система экстремального регулирования, непрерывно поддерживающая оптимальную влажность шихты, обеспечивающая максимальную газопроницаемость слоя шихты и оптимальные показатели технологических параметров процесса при воздействии неуправляемых помех.

**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 № 2791307 «Устройство для производства титановых окатышей». Результаты и основные положения работы используются в учебном процессе СКГМИ (ГТУ).

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

**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.

**Обоснованность и достоверность научных положений** и выводов подтверждается:

– соответствием результатов теоретических и экспериментальных исследований;

– результатами разработанного устройства для производства титановых окатышей.

**Апробация работы.** Основные результаты проведенных в диссертации исследований были доложены и обсуждены на:

- 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.** Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 12 трудах, в том числе, в изданиях входящих в перечень ВАК – 3 статьи. Получен 1 патент на изобретение РФ.

**Соответствие паспорту научной специальности.** Диссертационная работа полностью 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».

**Структура и объем диссертации.** 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.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** показана актуальность работы, представлены основные научные результаты, определены их научная новизна и практическая значимость, перечислены положения, выносимые на защиту, дана информация об апробации и реализации результатов работы.

**В первой главе** рассмотрено современное состояние вопроса в выбранном направлении, сформулирована цель и задачи дальнейшего исследования. Представлен анализ проведенных ранее различными авторами исследований процессов, протекающих при получении металлических окатышей на обжиговой конвейерной машине. Анализ и исследование известных литературных источников показывает, что применение методов математического моделирования и оптимизации в производстве окатышей из титаносодержащих концентратов требует проведения дополнительных исследований.

С учетом достигнутых научных результатов, дальнейшие работы по улучшению технико-экономических показателей процесса получения титановых окатышей целесообразно вести путем комплексного исследования на основе моделирования и оптимизации конструктивных и режимных параметров с использованием современных средств цифровизации управления технологическими процессами и методов обработки информации.

**Вторая глава** посвящена математическому моделированию процесса формирования титановых окатышей в барабанном окомкователе. Приведена математическая модель процесса окомкования в виде системы дифференциальных уравнений и полученные результаты обобщены экспериментально-статистическими методами. На вход в барабан подается шихта – смесь ильменита  $FeO \cdot TiO_2$  и антрацита со связующим веществом – сульфит-спиртовой бардой (ССБ). На выходе получают окатыши-гранулы, диаметром 10-15 мм. В моделях выделены две фазы – фаза шихты и фаза

окатышей. Представлена система дифференциальных уравнений в частных производных, описывающая взаимодействие твердых компонентов шихты с ССБ, в результате чего при перемещении этих компонентов в окомкователе формируются окатыши. Построение математической модели, адекватной изучаемому процессу, дает возможность переходить к решению экстремальных задач и проверке полученных результатов экспериментальным путем.

Процесс окомкования состоит из двух этапов: образования зародышей и накатывания шихты.

Образование зародыша происходит следующим образом: капля ССБ попадает в слой шихты и, благодаря силам поверхностного натяжения, притягивает к себе частицы шихты. Образуются переувлажненные комки, обладающие высокой пластичностью.

Частицы шихты в зародыше окружены жидкостью и обладают относительной свободой перемещения, благодаря чему облегчается процесс уплотнения окатыша. Зародыши, скрепленные молекулярными силами притяжения, достаточно прочны и могут выдерживать без разрушения динамические нагрузки в окомкователе.

Вторая стадия формирования окатыша – его рост, осуществляется в результате многократных ударов о неподвижный слой материала при скатывании в окомкователе. Под действием динамических нагрузок зародыши уплотняются, то есть отдельные частицы в результате взаимного перемещения укладываются более плотно. При этом избыточная влага выдавливается на поверхность зародыша, благодаря чему становится возможным дальнейшее присоединение все новых частиц. При данном режиме работы окомкователя существует минимальная толщина пленок жидкости внутри окатыша, соответствующая величине динамических нагрузок. Как только этот предел будет достигнут, дальнейшее выделение жидкости на поверхность окатыша прекратится, и он перестанет расти.

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.

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

Капиллярные силы возникают на поверхности прослойки 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.

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.

При построении модели приняты следующие допущения: шихта однородна по гранулометрическому и химическому составу; не происходит слипания и разрушения окатышей, налипание их на стенки барабана; окатыши имеют правильную форму; уплотнение окатышей происходит равномерно; в каждой зоне содержится постоянное количество материала.

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

Дифференциальные уравнения составляются относительно функций вида

$$m_i^*(t, r) = \lim_{\Delta r \rightarrow 0} m_i(t, c, r + \Delta r) / \Delta r \quad (1)$$

$m_i^*(t, r)$  – 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;

$$n_i^*(t, r) = \lim_{\Delta r \rightarrow 0} n_i(t, c, r + \Delta r) / \Delta r \quad (2)$$

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

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

$$m_i^{*CCB}(t, r) = \lim_{\Delta r \rightarrow 0} m_i^{CCB}(t, c, r + \Delta r) / \Delta r \quad (3)$$

$m_i^{*CCB}(t, r)$  – 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:

$$\frac{\partial m_i^*(t, r)}{\partial t} + (R_1 + R_2) \frac{\partial m_i^*(t, r)}{\partial r} = g_{\text{ВЫХ}} \left( \frac{m_{i-1}^*(t, r)}{M_{i-1}^{\text{общ}}} - \frac{m_i^*(t, r)}{M_i^{\text{общ}}} \right) + (\mu_1^{\text{CCB}} - \mu^{\text{Ш}}) \cdot n_i^*(t, r) \quad (4)$$

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;  $\mu_1^{\text{CCB}}$  – 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

$$\frac{\partial n_i^*(t, r)}{\partial t} + (R_1 + R_2) \frac{\partial n_i^*(t, r)}{\partial r} = g_{\text{ВЫХ}} \left[ \frac{n_{i-1}^*(t, r)}{M_{i-1}^{\text{общ}}} - \frac{n_i^*(t, r)}{M_i^{\text{общ}}} \right] \quad (5)$$

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

$$\frac{\partial m_i^{*CCB}(t, r)}{\partial t} + (R_1 + R_2) \frac{\partial m_i^{*CCB}(t, r)}{\partial r} = \mu_i^{\text{CCB}} \cdot m_i(t, r) + g_{\text{ВЫХ}} \cdot m_{\text{К}} \left( \frac{n_{i-1}^*(t, r)}{M_{i-1}^{\text{общ}}} - \frac{n_i^*(t, r)}{M_i^{\text{общ}}} \right), \quad (6)$$

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

Уравнение изменения массы шихты

$$\frac{dm_i^{\text{Ш}}(t)}{dt} = g_{\text{ВЫХ}} \left( \frac{m_{i-1}^{\text{Ш}}(t)}{M_{i-1}^{\text{общ}}} - \frac{m_i^{\text{Ш}}(t)}{M_i^{\text{общ}}} \right) - \mu_0, \quad (7)$$

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

$$\mu_0 = \int_{R_0}^{R_{\text{max}}} \mu^{\text{Ш}} \cdot n_i^*(t, r) dr, \quad (8)$$



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

Масса материала в зоне

$$\mu_i^{ССБ} = \frac{m_i^*(t,r)}{n_i^*(t,r) \cdot M_i^{общ}} \cdot g_i^{ССБ} \quad (9)$$

Расход ССБ на один окатыш радиуса  $r$

$$\mu_i^{общ} = m_i^{ш}(t) + \int_{R_0}^{R_{max}} m_i^*(t,r) dr \quad (10)$$

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

Приращение радиуса окатыша за счет расхода ССБ

$$R_1 = \sqrt[3]{\frac{3\mu_i^{ССБ} \cdot t}{4\pi\rho_{ССБ}} + r^3} - r \quad t = 1c \quad (11)$$

Приращение радиуса окатыша за счет накатывания шихты

$$R_2 = \sqrt[3]{\frac{100}{\varepsilon} \left( \frac{3\mu_i^{ССБ}}{4\pi\rho_{ССБ}} + r^3 \right) + \left( \frac{100}{\varepsilon} - 1 \right) (r - R_y)} - r \quad (12)$$

при  $t = 1c$

$\rho_{ССБ}$  – 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

$$\mu^{ш} = \frac{400\pi\rho_{ш}}{3\varepsilon} \left[ \frac{3\mu_i^{ССБ} \cdot t}{4\pi\rho_{ССБ}} + r^3 - (r - R_y)^3 \right], \quad (13)$$

при  $t = 1c$

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

Масса переноса материала из зоны в зону

$$g_{вых} = G_{загр} + G_{возвр} \quad (14)$$

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

**Третья глава** посвящена математическому моделированию и оптимизации режима технологического 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. Разработаны математическая и компьютерная модели оптимизации теплотехнологического процесса сушки движущейся плотной многослойной массы титановых окатышей, позволившие оптимизировать энергоресурсоэффективность сложной динамической теплотехнологической системы производства титановых окатышей. Полученные результаты применяли для расчета энергоэффективной сушки окатышей 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, позволяющие получить минимальное содержание влаги в титановых окатышах за промежуток времени,

определенный техническим заданием, без дополнительного расхода электроэнергии.

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. 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.

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 в ходе его продвижения на металлической ленте.

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:

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

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

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

$$m_{\text{ок}}(t, x, x + \Delta x) = m_{\text{ок}}(t, x - Vt, x) - g_{\text{п}} \Delta t \Delta x, \quad (15)$$

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 (15) на  $\Delta x$  и перейдем к пределу при  $\Delta x \rightarrow 0$ :

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{m_{\text{ок}}(t, x, x + \Delta x)}{\Delta x} = \frac{\lim_{\Delta x \rightarrow 0} m_{\text{ок}}(t, x - V\Delta t, x) - g_{\text{п}}\Delta t}{\Delta x} - g_{\text{п}}\Delta t\Delta x. \quad (16)$$

Имеем

$$P_1(t + \Delta t, x) = P_1(t, x - c\Delta t) - g_{\text{п}}\Delta t. \quad (17)$$

Прибавим  $-P_1(t, x)$  к двум частям равенства (17):

$$P_1(t + \Delta t, x) - P_1(t, x) = P_1(t, x - V\Delta t) - P_1(t, x) - g_{\text{п}}\Delta t. \quad (18)$$

Разделим уравнение (18) на  $\Delta t$ , перейдем к пределу при  $\Delta t \rightarrow 0$ . Умножим и разделим числитель и знаменатель на  $V$ :

$$\frac{\partial P_1(t, x)}{\partial x} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{-V(P_1(t, x - V\Delta t) - P_1(t, x))}{-V\Delta t} - g_{\text{п}}. \quad (19)$$

Обозначим  $-V\Delta t = \Delta x$

Получим

$$\Delta x = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{-V(P_1(t, x - V\Delta t) - P_1(t, x))}{\Delta x} - g_{\text{п}} \text{ или} \\ \frac{\partial P_1(t, x)}{\partial t} = -V \frac{\partial P_1(t, x)}{\partial x} - g_{\text{п}}. \quad (20)$$

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

Изменение массы окатыша:

$$\frac{\partial P_1(t, x)}{\partial t} + V_1 \frac{\partial P_1(t, x)}{\partial x} = g_1. \quad (21)$$

Граничные условия уравнения (21):

$$P_1(t, 0) = \frac{G_{\text{ок}}(t)}{V_1(t)}. \quad (22)$$

Изменение объема воды в окатыше:

$$\frac{\partial P_2(t, x)}{\partial t} + V_1 \frac{\partial P_1(t, x)}{\partial x} = -g_1. \quad (23)$$

Граничное условие уравнения (23):

$$P_2(t, 0) = \frac{G_{\text{ок}}(t)[H_2O]}{V_1(t)}. \quad (24)$$

Уравнение изменения количества тепла в окатышах:

$$\frac{\partial Q_1}{\partial t} + V_1 \frac{\partial Q_1(t, x)}{\partial x} = -(T_1 C_{H_2O} + \alpha_{H_2O})g_1 + g_2. \quad (25)$$

Граничное условие уравнения (25):

$$Q_1(t, 0) = C_{H_2O} G_{\text{ок}}(t) T_{\text{вх}}. \quad (26)$$

Уравнение изменения количества газа:

$$\frac{\partial P_3^i(t, x)}{\partial t} - V_2 \frac{\partial P_3^i(t, x)}{\partial x} = q_1, i = 1, n, \quad (27)$$

где  $n = 9$  – число зон.

Граничное условие уравнения (27):

$$P_3^i(t, x_i) = \frac{G_n^i(t)}{V_2(t)} + P_3^{i+1}(t, x_i). \quad (28)$$

Уравнение изменения объема влаги в газе:

$$\frac{\partial P_4^i(t, x)}{\partial t} - V_2 \frac{\partial P_4^i(t, x)}{\partial x} = q_1, i = 1, n. \quad (29)$$

Граничное условие уравнения (29):

$$P_4^i(t, x_i) = \frac{G_r^i(t)[H_2O]^{\text{mac}}}{V_2(t)} + P_4^{i+1}(t, x_i). \quad (30)$$

Уравнение изменения количества тепла в газе:

$$\frac{\partial Q_2^i(t, x)}{\partial t} + V_2 \frac{\partial Q_2^i(t, x)}{\partial x} = (T_1 C_{H_2O} + \alpha_{H_2O}) g_1 - g_2 - g_3, \quad i = 1, n. \quad (31)$$

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

Граничное условие уравнения (31):

$$Q_2^i(t, x) = C_2 T_2^{\text{BX}} G_r(t) + Q_2^{i+1}(t, x_i). \quad (32)$$

Расчет правых частей

Используя уравнение Менделеева-Клапейрона, найдем скорость газа:

$$\rho_{H_2O}^\Gamma = \frac{m_{H_2O} RT_\Gamma}{\mu_{H_2O} V_\Gamma}, \quad (33)$$

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 (33) на  $\Delta x$ :

$$\rho_{H_2O}^\Gamma = \frac{m_{H_2O}}{\Delta x} \frac{RT_\Gamma}{\mu_{H_2O}} \frac{1}{V_\Gamma/\Delta x}. \quad (34)$$

здесь  $V_\Gamma/\Delta x = S$ ,  $m_{H_2O}/\Delta x = P_\text{ч}$  и  $\rho_{H_2O}^\Gamma = P_\text{ч} RT_\Gamma/\mu_{H_2O} S$ , где  $S$  – площадь сечения, занимаемая газом, м<sup>2</sup>.

Скорость газа определяем по общей формуле

$$V_\Gamma = \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_{H_2O}^{\Gamma(i)} - P_{H_2O}^{\Gamma(i+1)})}. \quad (35)$$

Подставив уравнение (34) в (35), получим

$$V_\Gamma = \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_4^i T_\Gamma^i - P_4^{i+1} T_\Gamma^{i+1}) R/\mu_{H_2O} S}. \quad (36)$$

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

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

где  $S$  – площадь испарения.

Тогда

$$\rho_\text{ок} = \frac{m}{V} = - \frac{m(t, \alpha, x, x + \Delta x)}{N_\text{ок}(t, \alpha, x, x + \Delta x) \frac{4}{3} \pi R^3}, \quad (37)$$

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

Преобразуем выражение

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

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

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

$$S = N_\text{пр} 4\pi R^2 [H_2O],$$

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

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

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

Количество тепла, ушедшее из II зоны в I зону:

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

$$g_2 = \frac{3P_1}{R\rho_{ок}} 0,52 [T_2 - T_1].$$

Количество тепла, ушедшее из II зоны во внешнюю среду:

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

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

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

Физический смысл критерии 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:

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

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

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 обжиговой машине. Обнаружено, что в оптимальном режиме многослойной сушки окатышей снижается расход энергии и увеличивается качество готового продукта, уменьшается доля возврата, обеспечивая ресурсосбережение.

Результаты моделирования могут использоваться в дальнейших теоретических и прикладных исследованиях технологического процесса сушки титановых окатышей и при создании многоуровневых систем управления для сложных металлургических процессов, функционирующих в условиях дефицита информации.

Кроме того, в главе представлена математическая модель процесса восстановления оксидов металлов твердым углеродом, полученная на основе теории углетермического восстановления оксидов. Приведен метод определения термодинамической температуры начала восстановления оксида твердым углеродом и равновесный состав газовой фазы в заданном интервале давлений. Предложенная методика является актуальной для имитационного моделирования и определения оптимальных условий металлургических процессов.

Далее описаны методы исследования и моделирования процессов

теплопередачи при рекуперации нагретого воздуха в стационарных условиях. Составлено математическое описание системы, приведены статические и динамические решения разработанной модели применением пакета программ Mathcad.

**Четвёртая глава** посвящена моделированию и оптимизации газодинамических параметров шихты в процессе получения титановых окатышей. Влажность шихты является главным параметром и с этим параметром связаны скорость просасывания воздуха, насыпная масса, усадка слоя и скорость перемещения зоны сушки. Методами регрессионного анализа построены математические модели зависимости газопроницаемости слоя шихты, усадки слоя, насыпной массы и скорости перемещения в зоны сушки от её влажности. Находится выражение для оптимальной влажности шихты.

На основе теоретических и экспериментальных данных составлена компьютерная имитационная программа, позволяющая определить оценку оптимальных параметров в производстве получения окатышей.

Математическая обработка экспериментальных результатов позволила получить уравнения регрессии, которые адекватны экспериментальным данным.

Важным этапом в производстве окатышей является процесс увлажнения шихты (исходного сырья) для достижения её оптимальной газопроницаемости с целью увеличения производительности агломерационных 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.

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.

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

Содержание влаги оказывает очень сильное влияние на газопроницаемость слоя окомкованной шихты. Результаты исследования Г.И. Волковицкого, Н.М. Якубцинера, Ю.П. Смирнова, Н.З. Плоткина, В.И. Коротича 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), растёт 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. 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.

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. Окончательно приняты модели, дающие наиболее точность.

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 (38), насыпную массу (39), усадку слоя (40) и скорость перемещения зоны сушки (41).

Экспериментальные данные, которые приведены в работе (В.И. Коротича и В.П. Пузанова. Теоретические основы окомкования железорудных материалов) дают графические выражения взаимосвязи следующих параметров процесса: скорость просасывания воздуха  $\vartheta$ , насыпная масса  $d$ , усадка слоя  $\Delta h$  и скорость перемещения зоны сушки  $\vartheta_1$  в зависимости от влажности шихты  $\omega$ .

На рисунке 1 на основе уравнения (38) приведен график зависимости влажности шихты  $\omega$  на скорость просасывания воздуха  $\vartheta$ . Из рис. 1 следует, что полученная модель сходится с экспериментальными данными.

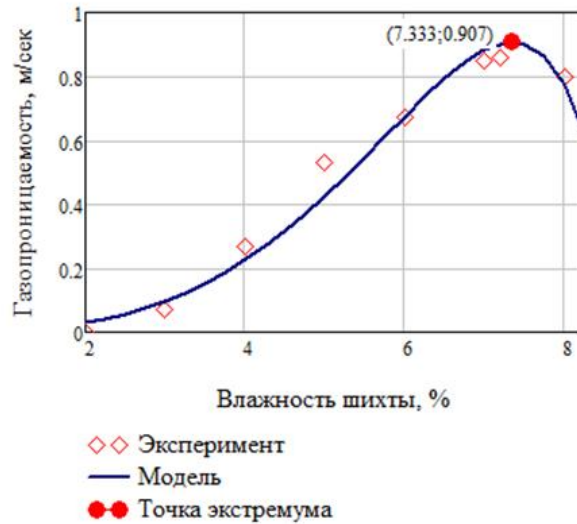


Рис.1. График влияния влажности шихты  $\omega$  (%) на скорость просасывания воздуха  $\vartheta$  (м/сек)

В результате обработки экспериментальных данных получено следующее уравнение регрессии:

$$\vartheta(\omega) = 2,493 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1}{\omega} + 3.877 \cdot 10^{-3} \cdot \omega^3 - 4.066 \cdot 10^{-4} \cdot e^{\omega} \quad (38)$$

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  $\gamma=0.95$ . Модель адекватна ( $F_{\text{расч}} \gg F_{\text{табл}}$ ).

На рисунке 2 на основе уравнений регрессии (39-41) приведены графики зависимости влажности шихты на насыпную массу (39), усадку слоя (40) и скорость перемещения зоны сушки (41).

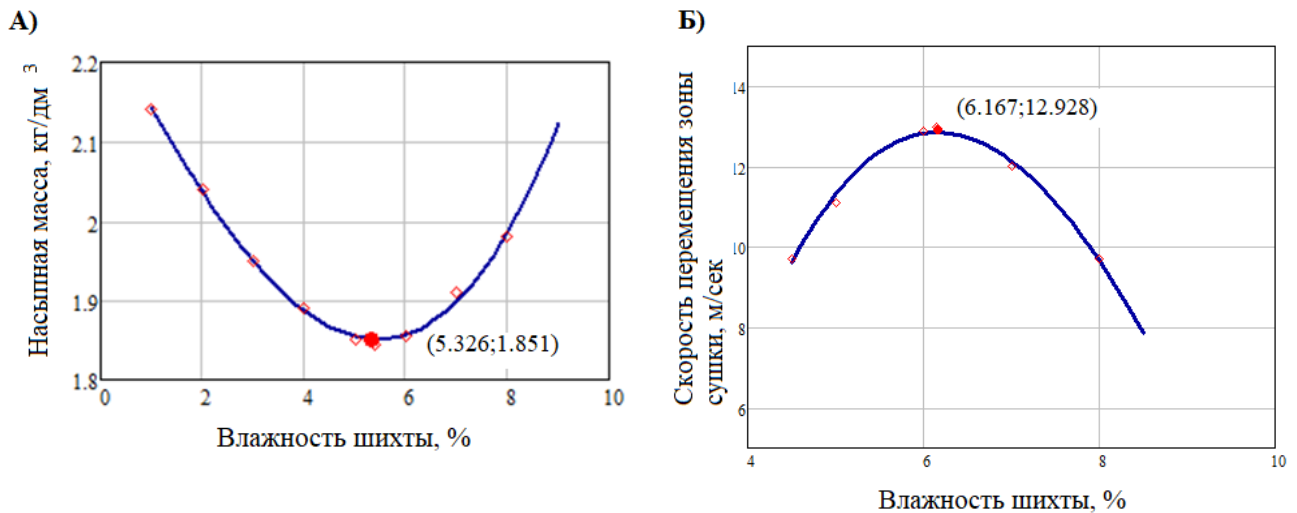






Рис. 2. Влияние влажности шихты  $\omega$  (%) на: А) насыпную массу  $d$  (кг/дм<sup>3</sup>); Б) скорость перемещения зоны сушки  $\vartheta_1$  (м/сек); В) усадку слоя  $\Delta h$  (мм)

Влияние влажности шихты на насыпную массу аппроксимировано следующим уравнением регрессии:

$$d(\omega) = 8.678 \cdot 10^{-4} \cdot \omega^3 + 4.357 \cdot 10^{-3} \cdot \omega^2 - 0.125 \cdot \omega + 2.262 \quad (39)$$

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  $\gamma=0.95$ . Модель адекватна ( $F_{\text{расч}} \gg F_{\text{табл}}$ ).

Влияние влажности шихты на усадку слоя представлено следующим уравнением регрессии:

$$\Delta h(\omega) = -0.05 \cdot \omega^3 + 0.348 \cdot \omega^2 + 0.26 \cdot \omega + 0.646 \quad (40)$$

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

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

$$\vartheta_1(\omega) = 0.064 \cdot \omega^3 - 2.242 \cdot \omega^2 + 20.386 \cdot \omega - 42.536 \quad (41)$$

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  $\gamma=0.95$ . Модель адекватна ( $F_{\text{расч}} \gg F_{\text{табл}}$ ).

Адекватность уравнений регрессий (38-41) подтверждена с помощью критерия Фишера. Высокое значение коэффициента корреляции ( $R=0,99$ ) подтверждает этот результат.

Таким образом, использование экспериментальных данных в сочетании с моделированием позволило получить связь влажности шихты со скоростью просасывания воздуха, насыпной массой, усадкой слоя и скоростью перемещения зоны сушки, и найдена корреляция между ними.

Математическую модель процесса получения окатышей можно использовать для разработки математических моделей многих технологических процессов, проводимых в агломашинах.

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.

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.

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

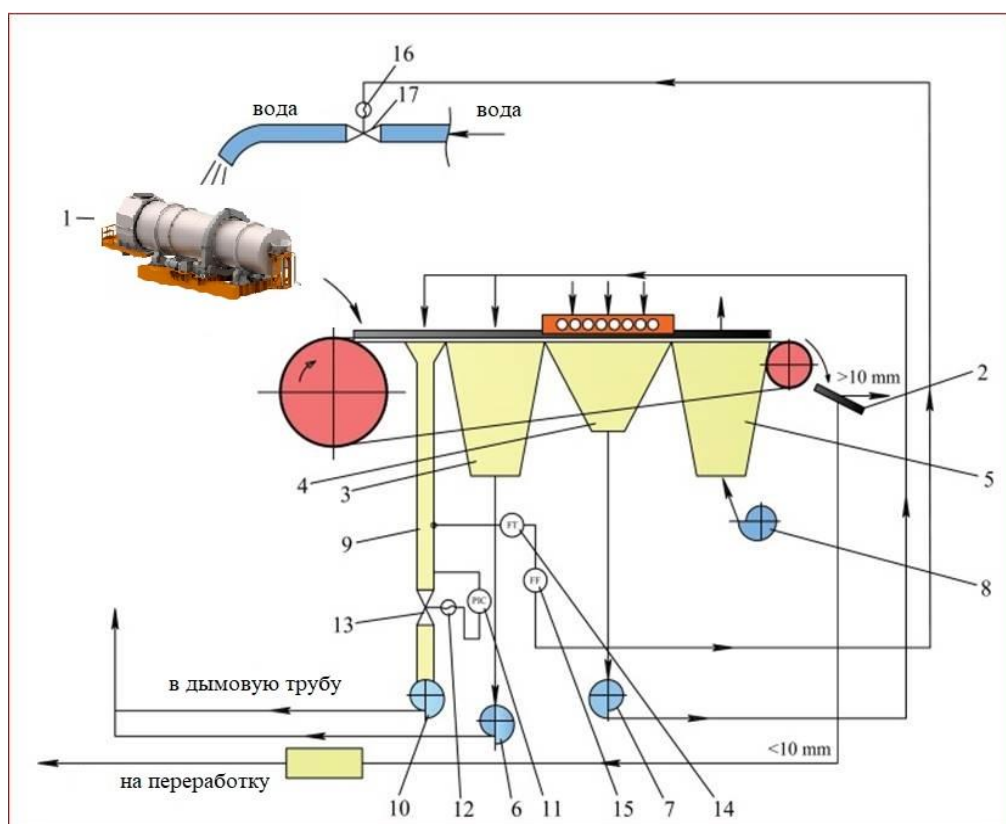


Рис. 3. Обжиговая конвейерная машина с установленной измерительной вакуум-камерой для производства титановых окатышей

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

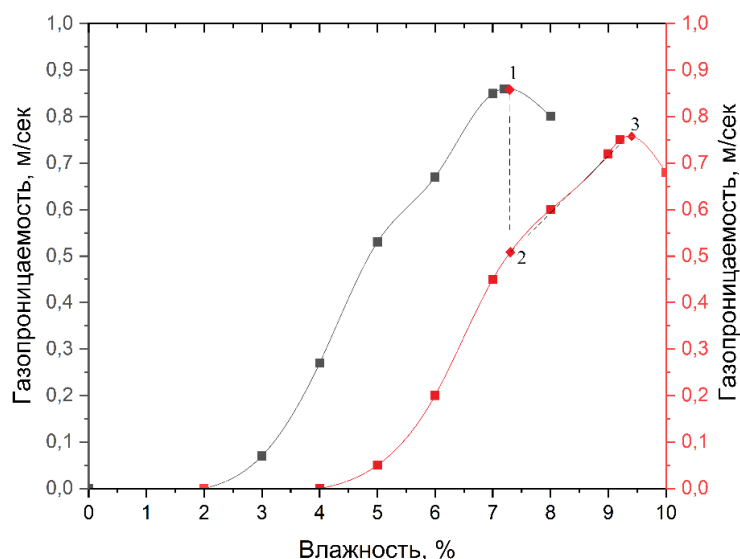


Рис. 4. Схема поиска оптимальной газопроницаемости слоя шихты при изменяющихся условиях работы обжиговой машины

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.). 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.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

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 ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Публикации в изданиях, входящих в международную базу банных и систему цитирования Scopus:*

1. **Бахтеев, Э.М.** 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.

*Публикации в изданиях из Перечня ВАК:*

2. **Бахтеев, Э.М.** 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.

3. **Бахтеев, Э.М.** Моделирование процесса формирования титановых окатышей в барабанном окомкователе / А.Л. Рутковский, Э.М. Бахтеев, Х.А. Бутов // Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2023. Т. 19. №2 (32). С. 66-73.

*Публикации в зарубежных и других изданиях:*

4. **Bakhteev, E.M.** Optimization of the charge preparation process in the production of titanium pellets / E.M. Bakhteev, A.L. Rutkovskiy, Kh.A. Butov // Colloquium-journal, Wydawca «Interdruk», Poland, Warszawa. – №30 (153). – 2022. – P. 15-19.

5. **Бахтеев, Э.М.** 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.

6. **Бахтеев, Э.М.** 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: Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), 2022. С. 78-83.

7. **Бахтеев, Э.М.** Разработка системы контроля газопроницаемости шихты в производстве титановых окатышей / А.Л. Рутковский, Э.М. Бахтеев, А.М. Ачилов // Труды СКГМИ. Вып. 29. 2022. С. 19-22.

8. **Бахтеев, Э.М.** Устройство для оптимизации подготовки шихты в производстве титановых окатышей / А.Л. Рутковский, Э.М. Бахтеев, М.Э. Багаева, А.К. Макоева // IV Всероссийская научно-практическая конференция «Современные научно-технические и социально-гуманитарные исследования актуальные вопросы, достижения и инновации». – Владикавказ: СКГМИ (ГТУ), 2022. С. 52-56.

9. **Бахтеев, Э.М.** Оптимизация режима процесса формирования титановых окатышей / А.Л. Рутковский, Э.М. Бахтеев, Х.А. Бутов, А.М. Ачилов // IV Всероссийская научно-практическая конференция «Современные научно-технические и социально-гуманитарные исследования актуальные вопросы, достижения и инновации». – Владикавказ: СКГМИ (ГТУ), 2022. С. 48-52.

10. **Бахтеев, Э.М.** 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.

11. **Бахтеев, Э.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.

*Патент:*

12. Патент на изобретение: №2 791 307. Устройство для производства титановых окатышей / А.Л. Рутковский, Э.М. Бахтеев. Опубликовано: 07.03.2023, Бюл. № 7.

**Благодарности**

Автор выражает глубокую благодарность и признательность своему научному руководителю, д.т.н., проф. Рутковскому А.Л. за неоценимую помощь, внимание и поддержку на протяжении проведения всех этапов работы, участие в обсуждении результатов и получение ценных рекомендаций и заведующей кафедрой, д.т.н., проф. Хадзараговой Е.А., а также всем сотрудникам кафедры МЦМАМП СКГМИ (ГТУ) за консультации и всестороннюю поддержку.