

*На правах рукописи*

**Моргунов Владимир Викторович**



**СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ СПЕКАНИЯ  
ШИХТЫ В ТРУБЧАТЫХ ВРАЩАЮЩИХСЯ ПЕЧАХ  
НА ОСНОВЕ ПРОГНОЗНОЙ МОДЕЛИ И ЭКСПЕРТНОЙ  
БАЗЫ ПРАВИЛ**

*Специальность 2.3.3. Автоматизация и управление техно-  
логическими процессами и производствами*

**Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2026

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

**Научный руководитель:**

кандидат технических наук, доцент

*Федорова Эльмира Рафаэльевна*

**Официальные оппоненты:**

*Уткин Лев Владимирович*

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Институт компьютерных наук и кибербезопасности, Высшая школа технологий искусственного интеллекта, профессор;

*Каплун Дмитрий Ильич*

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», кафедра автоматизации и процессов управления, доцент.

**Ведущая организация** – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», г. Иркутск.

Защита диссертации состоится **30 июня 2026 г. в 14:00** на заседании диссертационного совета ГУ.12 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, аудитория № 1163.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте [www.spmi.ru](http://www.spmi.ru).

Автореферат разослан 30 апреля 2026 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
диссертационного совета



ВАСИЛЬЕВА  
Наталья Васильевна

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

Процесс спекания в трубчатых вращающихся печах (ТВП) мокрого типа является одним из основных процессов при переработке нефелина и получении глинозема.

ТВП является сложным объектом управления (ОУ), характеризуется высокой инерционностью и неопределенным запаздыванием по большинству каналов связи, нелинейностью, многосвязностью параметров, параметрической неопределенностью, сложностью протекающих процессов, высокими температурами и большими затратами на топливо. Существующие системы управления (СУ) ТВП преимущественно представлены локальными системами автоматического регулирования (САР) с постоянной ручной корректировкой оператором, что приводит к нестабильности температурного профиля печи и, как результат, снижается степень извлечения глинозема из спека, повышается расход топлива, увеличивается время простоев агрегата из-за ускоренного износа футеровочных материалов, происходит изменение формы рабочего пространства (ФРП) в печи за счет формирования избыточного количества обмазки и колец в агрегате.

Перспективным решением является переход на систему усовершенствованного управления технологическим процессом (СУУ ТП), где одними из основных элементов являются программные модули на третьем уровне СУ: адекватная комплексная прогнозная модель ОУ и экспертная база правил (БП).

Предлагаемая СУУ ТП позволит оценивать тепловое состояние зон ТВП на основе значений контролируемых и предсказанных по модели параметров, выбирать и рассчитывать управляющие воздействия на основе БП нечеткой логики и результатов работы прогнозной модели ОУ, что позволит стабилизировать температурный профиль печи и повысить степень извлечения глинозема.

### **Степень разработанности темы исследования**

Значительный вклад в развитие моделирования и управления процессами, протекающими в мокрых ТВП, внесли следующие ученые: И.Л. Галмуд, В.П. Почивалов, О.Н. Захаржевский, В.А. Корчевский, Ф.Н. Строков, Н.И. Влодавец, Х.А. Бадалянц, Е.А. Беликов,

Б.Г. Злоказов, И.М. Костин, М.В. Левин, Р.Г. Лошкин, С.Г. Стародубровский, О.Н. Тихонов, О.А. Чащин, В.Д. Рывкин, В.А. Абрамов, Б.И. Арлюк, Н.Г. Срибнер, Е.И. Ходоров, В.М. Сизяков, П.В. Беседин, И.И. Лапаев, П.А. Трубаев, В.К. Классен, М.В. Нусс.

Среди зарубежных авторов стоит отметить: K.E. Peray, A.A. Boateng, H. Henien, J. K. Brimacombe, A.P. Watkinson, Ashish Agrawal, P.S. Ghoshdastidar, J. Mellmann, W.C. Saeman, H. Kramers, P. Crockewit, J. Perron, R.T. Bui, E. Lebas, A. Chatterjee, P.K. Mukhopadhyay, S.M. Zanolli, C. Pepe, G. Astolfi.

Вопросами автоматизации и моделирования процессов, протекающих в ТВП, занимались отечественные компании и институты, такие как АО «РУСАЛ ВАМИ», АО «ГИПРОЦЕМЕНТ», «ЦНИИЦветмета», «НИИЦемент», ОАО «ЮЖГИПРОЦЕМЕНТ».

**Объект исследования** – система управления процессом спекания нефелинового концентрата с известняком в трубчатой вращающейся печи на основе комплексной прогнозной модели и экспертной базы правил.

**Предмет исследования** – комплексная прогнозная модель трубчатой вращающейся печи, состоящая из моделей расчета влияния формы рабочего пространства в печи на параметры осевого движения материала, пылеуноса и пылеосаждения, горения факела, теплообмена в цепной зоне, протекания химических реакций, теплообмена в зонах без внутренних теплообменных устройств, и экспертные базы правил для нормального режима работы и для аварийных ситуаций.

**Цель диссертационной работы** – повышение степени извлечения глинозема из спека в трубчатой вращающейся печи для спекания нефелинового концентрата.

**Идея** – поставленная цель достигается за счет стабилизации температурного профиля в трубчатой вращающейся печи для спекания нефелинового концентрата с известняком с помощью системы усовершенствованного управления на базе программных модулей: комплексной прогнозной модели трубчатой вращающейся печи и экспертной базы правил для нормального режима работы и аварийных ситуаций.

### **Задачи исследования:**

1. Провести анализ существующих СУ процессом спекания в ТВП на предмет необходимости модернизации структуры АСУ ТП, аналитические исследования существующих научно-технических решений.

2. Разработать устройство для автоматического определения динамического угла откоса сыпучих материалов с применением системы технического зрения.

3. Определить параметры осевого движения сыпучего материала в печи (высоту слоя материала, среднее время пребывания материала в агрегате) на разработанной физической модели агрегата, позволяющей менять внутреннюю ФРП в ОУ.

4. Описать математическую модель (ММ) осевого движения сыпучего материала в печи, учитывающую изменяющуюся внутреннюю ФРП в агрегате, как составную часть комплексной прогнозной модели ТВП для спекания нефелинового концентрата с известняком;

5. Теоретически обосновать, разработать и верифицировать комплексную прогнозную модель процесса спекания нефелинового концентрата с известняком в ТВП.

6. Описать базу правил и состояний ОУ на основе знаний экспертов (технологи и операторы глиноземных и цементных предприятий), информации из литературных источников и анализа результатов математического моделирования.

7. Разработать алгоритм и структуру системы управления на базе комплексной прогнозной ММ процесса спекания и базы правил.

### **Научная новизна работы**

- установлена зависимость среднего времени пребывания и высоты слоя сыпучего материала в трубчатой вращающейся печи от изменяющейся внутренней формы рабочего пространства по длине агрегата;

- разработана математическая модель движения сыпучего материала в трубчатой вращающейся печи, как составная часть комплексной прогнозной модели печи;

- предложены структура и алгоритм расчета комплексной прогнозной модели процесса спекания нефелинового концентрата в трубчатой вращающейся печи;

- предложена структура системы управления процессом спекания нефелинового концентрата с известняком в трубчатых вращающихся печах на основе комплексной прогнозной модели печи и экспертной базы правил.

#### **Соответствие паспорту специальности**

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами по пунктам: 4. Теоретические основы и методы моделирования, формализованного описания, оптимального проектирования и управления технологическими процессами и производствами, 8. Научные основы, модели и методы идентификации производственных процессов, комплексов и интегрированных систем управления и их цифровых двойников, 12. Методы создания специального математического и программного обеспечения, пакетов прикладных программ и типовых модулей функциональных и обеспечивающих подсистем АСУТП, АСУП, АСТПП и др., включая управление исполнительными механизмами в реальном времени.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы:**

- разработано устройство для автоматического определения динамического угла откоса сыпучего материала во вращающемся цилиндре (патенты на изобретения № 2849726, № 2849725).

- реализована физическая модель вращающегося агрегата, позволяющая определять параметры осевого движения сыпучего материала в объекте с изменяющейся внутренней формой рабочего пространства.

- разработана комплексная прогнозная модель процесса спекания нефелинового концентрата с известняком в ТВП в качестве программного модуля системы управления, обеспечивающая расчет осевого движения материала, уноса и возврата пыли, процессов теплообмена во всех технологических зонах печи, горения факела, химических превращений и учитывающая при расчете наличие цепной завесы и форму внутреннего рабочего пространства агрегата (свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024662839, № 2024662736).

- результаты исследований использованы в деятельности компании АО «Моделирование и цифровые двойники» при моделировании движения материала в трубчатых вращающихся печах, а также при оптимизации параметров процесса спекания (акт о внедрении от 01.04.2026).

**Методология и методы исследования.** Работа выполнена с использованием метода научного обобщения, аналитических исследований литературных источников, патентных материалов и результатов, полученных в ходе лабораторных испытаний.

Физическая модель выполнена с применением трехмерного САД-проектирования. Изготовление элементов модели осуществлено методом аддитивного производства (3D-печати).

Алгоритм системы технического зрения базируется на физических основах геометрической оптики и теории цифровой обработки сигналов и осуществлялась с применением библиотеки OpenCV на языке программирования Python.

Программная реализация модели выполнена на языке Python. В основе модели лежит зональный подход к математическому описанию ТВП. Расчет теплообменных и газодинамических процессов осуществлялся с использованием итерационных методов решения нелинейных уравнений: метод Брента, модифицированный метод Ньютона с численным вычислением производных по схеме конечных разностей и метод последовательных приближений.

Определение величин управляющих воздействий осуществлялось на основе теории нечетких множеств Заде и комплексной прогнозной модели ТВП.

Экспериментальные исследования выполнялись на разработанных физической модели и лабораторном стенде на базе кафедры автоматизации технологических процессов и производств Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II.

Положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель осевого движения сыпучего материала во вращающемся цилиндрическом агрегате с меняющейся внутренней формой рабочего пространства косвенно определяет неизмеряемые параметры: среднее время пребывания материала в печи

с погрешностью не более 11.8%, высоту слоя материала с погрешностью не более 14%.

2. Комплексная прогнозная модель печи, состоящая из моделей расчета влияния формы рабочего пространства в агрегате на параметры осевого движения материала, пылеуноса и пылеосаждения, горения факела, теплообмена в цепной зоне, протекания химических реакций, теплообмена в зонах без внутренних теплообменных устройств, и экспертная база правил в качестве модулей системы усовершенствованного управления технологическим процессом спекания нефелинового концентрата в трубчатых вращающихся печах позволяют стабилизировать режим работы печи и повысить степень извлечения глинозема более чем на 0.6%.

**Степень достоверности результатов исследования** обусловлена применением стандартных методов математического и численного моделирования, сходимости результатов имитационного моделирования с экспериментальными и архивными производственными данными, тестированием экспертной базы правил на промышленных архивных данных технологического процесса спекания нефелинового концентрата с известняком.

**Апробация результатов диссертации** проведена на 7 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 4 международных. За последние 3 года принято участие в 7 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 4 международных: XXXI Международный научный симпозиум «Неделя горняка» (30 января - 03 февраля 2023 года, Москва), Научная конференция студентов и молодых ученых «Полезные ископаемые России и их освоение» (25-28 апреля 2023 года, Санкт-Петербург), XIX Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (21-27 мая 2023 года, Санкт-Петербург), XII форум вузов инженерно-технологического профиля Союзного государства (23-27 октября 2023 года, Минск), XX Всероссийская конференция-конкурс студентов выпускного курса и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования» (01-07 декабря 2024 года, Санкт-Петербург), XCIV Международная научная конференция «Технические и Естественные науки» (26 декабря 2025 года, Санкт-Петербург).

**Личный вклад автора** заключается в проведении анализа научно-технической литературы и патентного поиска; формулировке цели и задач работы; выборе методологической стратегии исследования; разработке физической модели агрегата для исследования влияния внутренней ФРП объекта на параметры осевого движения сыпучего материала; выполнении лабораторных исследований на базе физической модели агрегата и устройстве для определения динамического угла откоса сыпучего материала, обработке полученных результатов; разработке комплексной математической модели исследуемого объекта управления; научном обобщении полученных результатов и подготовке публикации.

**Публикации.** Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 4 печатных работах, в том числе в 2 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях - в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus. Получены 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ и 2 патента на изобретения.

**Структура работы.** Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 154 наименования, и 6 приложений. Диссертация изложена на 236 страницах машинописного текста, содержит 92 рисунка и 53 таблицы.

#### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цель и задачи работы, научная новизна и практическая значимость работы, приведены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** представлено описание процессов, протекающих в ТВП для спекания нефелинового концентрата с известняком, дана характеристика ТВП как ОУ, проанализированы существующие СУ спекания, проведен анализ представленных в литературе ММ осевого движения материала в ТВП.

**Во второй главе** описано разработанное устройство для определения динамического угла откоса сыпучего материала с помощью методов технического зрения. Представлена методология и результаты измерения статического и динамического углов откоса и насыпной плотности для сыпучих материалов, использованных при физическом моделировании в диссертационном исследовании. Рассмотрена физическая модель влияния внутренней ФРП печи на среднее время пребывания и высоту слоя материала в ТВП. Представлена методика проведения экспериментов на физической модели и полученные результаты. Описана на основе проведенных опытов ММ осевого движения сыпучего материала.

**В третьей главе** предложены и аргументированы структура и алгоритм расчета комплексной прогнозной математической модели процесса спекания нефелинового концентрата с известняком в ТВП, адаптированные к реализации на ЭВМ. Подробно описаны модели: осевого движения материала, учитывающая внутреннюю ФРП печи; уноса и осаждения пыли; теплообмена в цепной зоне; теплообмена в зонах без теплообменных устройств; химических превращений; горения факела. Верификация комплексной прогнозной модели проведена на базе данных из научной литературы и на данных с исследуемого предприятия.

**В четвертой главе** предложена и обоснована структура СУУ ТП, представлены основные элементы СУ на основе комплексной прогнозной модели, рассмотренной в третьей главе, и экспертной базы правил. Предложено использовать СУ для работы в режиме советчика для стабилизации процессов, протекающих в ТВП. Оценка качества управления при внедрении СУ проведена с помощью имитационного моделирования.

**В заключении** сформулированы основные выводы, результаты проведенных экспериментальных и теоретических исследований.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

**1. Математическая модель осевого движения сыпучего материала во вращающемся цилиндрическом агрегате с меняю-**

щейся внутренней формой рабочего пространства косвенно определяет неизмеряемые параметры: среднее время пребывания материала в печи с погрешностью не более 11.8%, высоту слоя материала с погрешностью не более 14%.

Параметры осевого движения материала (высота слоя  $h(x)$  (м), среднее время пребывания MRT (мин)) определяют процессы теплообмена в слое (рисунок 1). Факторы, влияющие на данные параметры, можно разделить на четыре группы: физико-химические превращения материала (расход материала  $G_M$  (кг/кг спека), насыпная плотность  $\rho_{bulk}$  (кг/м<sup>3</sup>), динамический угол откоса  $\beta$  (град.), статический угол откоса  $\varphi$  (град)), технологические параметры (расход шихты  $G_{ш}$  (кг/ч), скорость вращения  $n$  (об/мин), наклон печи  $\alpha$  (град.)), конструктивные параметры (внутренний радиус кожуха печи  $R_{вн}$  (м), толщина футеровки  $s_{ф}$  (м), высота подпорного кольца  $h(0)$  м, а также параметры внутренних теплообменных устройств) и изменяющаяся ФРП (толщина обмазки  $s_{об}$  (м), протяжённость обмазки  $l_{об}$  (м)).

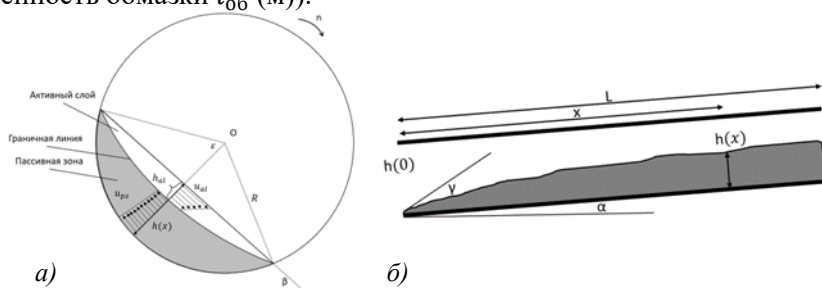


Рисунок 1 – Параметры движения материала в ТВП:

*а)* поперечные; *б)* осевые

Наиболее полной ММ для определения параметров осевого движения материала в ТВП является модель, предложенная Е.И. Ходоровым. Влияние последней группы параметров в научной литературе описано ограниченно и не содержит ММ, которые позволяют учесть влияние внутренней ФРП на параметры осевого движения материала.

Защищаемая в диссертационной работе ММ позволяет определить параметры «высота слоя материала» и «среднее время пребывания материала в агрегате» за счет введенного безразмерного коэффициента  $k_{об}$  (1), который получен в ходе экспериментов, проведенных на разработанной физической модели агрегата (рисунок 2).

$$k_{об} = 1 + 1.1 \left( \frac{s_{об}}{R_{вн} + s_{ф}} \right)^{1.42} \quad (1)$$

где  $k_{об}$  – безразмерный коэффициент толщины обмазки,

$s_{об}$  – толщина обмазки, м,

$R_{вн}$  – внутренний радиус кожуха печи, м,

$s_{ф}$  – толщина футеровки, м,

Для физического моделирования избыточной обмазки и колец по длине агрегата на основе литературных данных разработаны четыре типа внутренней ФРП: «прямая», «сужение», «кольцо» и «реалистичная» (рисунок 3). Аддитивные технологии позволили реализовать как упрощённые варианты, так и барабан с ФРП, масштабно повторяющей реальную геометрию, состоящий из сегментов типа «реалистичная» (рисунок 4). Всего было проведено 11 экспериментов с различными типами внутренней ФРП. Перечень рассмотренных сегментов и собранных из них барабанов представлен в таблицах 1 и 2 соответственно.

Одним из критериев подобия физической модели является режим «качения», характеризующийся наличием активного слоя и пассивной области (рисунок 1). Для подбора параметров модели и определения динамического угла откоса было разработано устройство с системой технического зрения (рисунок 5). Программное обеспечение реализовано на Python с использованием библиотеки OpenCV: изображение ограничивается круглой маской, выполняется пороговая сегментация в RGB с интерактивной настройкой, применяются морфологическое замыкание и Гауссово сглаживание. В результате формируется бинарная маска материала, по которой определяется профиль свободной поверхности и аппроксимируется прямой линией для вычисления динамического угла откоса (рисунок 6).

К числу принятых допущений и ограничений модели следует отнести то, что геометрия обмазки в пределах одного поперечного

сечения печи имеет одинаковую толщину по всей окружности. Также следует отметить, что рассматриваемые закономерности справедливы на участках печи без внутренних теплообменных устройств, для сухой шихты с незначительным количеством жидкой фазы.

В ходе эксперимента измерялось среднее время пребывания методом трассирующих частиц. В качестве трассера использовался сыпучий материал эксперимента, окрашенный магнитной краской (рисунок 7). Измерение высоты слоя материала производилось в отсутствии вращения и подачи материала путем установки внутри барабана рейки с измерительными устройствами (TOF050C) (рисунок 7). Полученные профили высоты слоя приведенные к степени заполнения показаны на рисунке 8.

Коэффициент учета внутренней ФРП  $k_{об}$  используется при расчете объемного расхода материала  $Q$  ( $\text{м}^3/\text{ч}$ ) в ММ осевого движения сыпучего материала в агрегате в начале рассматриваемого участка (2):

$$Q = \frac{60k_1k_2k_{об}\pi}{45} n z \sqrt{\left( (2(R_{вн} + s_{\phi} + s_{об}) - h_0)h_0 \right)^3} \quad (2)$$

где  $z$  - безразмерная функция углов  $\alpha, \beta, \gamma$ ,

$k_1$  - безразмерный коэффициент, учитывающий динамические условия движения материала,

$k_2$  - безразмерный коэффициент, учитывающий наличие внутренних теплообменных устройств,

$k_{об}$  - безразмерный коэффициент толщины обмазки,

$Q$  - объемный расход материала,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ,

$n$  - скорость вращения печи, об/мин,

$s_{об}$  - толщина обмазки, м,

$R_{вн}$  - внутренний радиус кожуха печи, м,

$s_{\phi}$  - толщина футеровки, м,

$h_0$  - высота слоя материала в начальном сечении участка, м.

Результаты расчета высота слоя и времени пребывания материала по предложенной модели представлены на рисунке 8 и таблице 3 соответственно. Максимальная погрешность модели при расчете для всех рассмотренных типов ФРП составила: для расчёта профиля высоты материала 14%, для расчёта среднего времени пребывания 11.8%. Таким образом, данное положение считается доказанным.

**2. Комплексная прогнозная модель печи, состоящая из моделей расчета влияния формы рабочего пространства в агрегате на параметры осевого движения материала, пылеуноса и пылеосаждения, горения факела, теплообмена в цепной зоне, протекания химических реакций, теплообмена в зонах без внутренних теплообменных устройств, и экспертная база правил в качестве модулей системы усовершенствованного управления технологическим процессом спекания нефелинового концентрата в трубчатых вращающихся печах позволяют стабилизировать режим работы печи и повысить степень извлечения глинозема более чем на 0.6%.**

Существующие СУ ТВП сталкиваются с рядом проблем, связанных с неконтролируемыми возмущениями и распределенными многосвязными параметрами ОУ. Предложенная структура СУУ ТП (рисунок 9) включает в себя пять блоков и два параллельных режима работы: аварийный и нормальный и функционирует в виде отдельного ПО на третьем уровне СУ.

Назначением «аварийного режима работы» является обеспечение сохранности технологического оборудования и максимально быстрое восстановление безопасного режима функционирования. В рамках данного режима сформирован набор правил, позволяющих идентифицировать возникновение нештатных ситуаций, требующих вмешательства оператора. Контроль выполнения этих правил осуществляется параллельно с функционированием СУ в «нормальном режиме», что обеспечивает возможность его прерывания при выявлении признаков аварийной ситуации.

Основной задачей «нормального режима работы» является стабилизация режимных параметров объекта. В данном режиме работы печь разбивается на две зоны – горячий и холодный конец печи. Тепловое состояние этих зон описывается с помощью лингвистической переменной «состояние зоны», значение которой определяется на основе нечеткой логики по значениям набора целевых параметров и экспертной базы правил.

На основе состояния обеих зон по базе правил определяется управляющий параметр и направление его изменения. Например, для стабилизации холодного конца печи может быть использован один

или несколько параметров: положение шиберов дымососа, положения дросселя горелки, положение лопаток горелки, положение горелки, расход топлива, а для горячего конца – расход технологической пыли. С помощью комплексной ММ определяется значение, на которое необходимо изменить выбранные управляющие параметры. Значения выводятся оператору в режиме советчика.

Ключевым элементом СУУ ТП является адекватная прогнозная модель процесса спекания нефелинового концентрата с известняком в ТВП. Комплексная прогнозная модель состоит из следующих моделей: расчета влияния ФРП в агрегате на параметры осевого движения материала, пылеуноса и пылеосаждения, горения факела, теплообмена в цепной зоне, протекания химических реакций, теплообмена в зонах без внутренних теплообменных устройств. Структура комплексной ММ представлена на рисунке 10.

Расчет комплексной ММ производится по следующему алгоритму (рисунок 11). На первом шаге вводятся необходимые данные, в том числе обновляется информация, получаемая с контрольно-измерительных приборов и по результатам лабораторных анализов, а также данные об изменении ФРП в результате образования обмазки с внешнего модуля. Принимаются начальные приближения по температурному профилю газа, материала и стенки для первой итерации расчета. Затем печь разбивается на сегменты на основе априорной информации о ходе технологического процесса и конструкции печи. Каждую выделенную зону описывает набор параметров, характеризующие физико-химические превращения шихты: статический и динамический углы откоса материала, насыпная плотность, расход материала на входе и выходе из зоны (кг/кг спека), которые выбираются на основе температуры материала, а также указывается их внутренний диаметр, протяженность, толщина обмазки и направление ожидаемого изменения высоты слоя.

Далее параллельно рассчитываются три модели: расчета влияния ФРП в агрегате на параметры осевого движения материала, пылеуноса и пылеосаждения, горения факела. Первая модель определяет профиль осевой скорости и профиль высоты слоя материала по длине печи (рисунок 12), вторая – количество пыли, уносимой в га-

зовом потоке в начале и конце каждой зоны на основе статистического подхода (рисунок 13), а также количество оседающего и улетающего материала, а третья модель – профиль температуры газа в зоне факела, несгоревшего топлива, количество и состав газов от факела (рисунок 14)

Следующим шагом параллельно рассчитываются модели цепной зоны и химических реакций (рисунок 15). Параллельный расчет возможен с учетом допущений, что в зоне цепной завесы не происходит физико-химических превращений за исключением сушки, основная часть влаги испаряется в цепной зоне, а оставшаяся – в последующей зоне досушки, что учитывается в модели теплообмена. Модель цепной зоны определяет температуру газа на входе в зону и температуру и влажность материала на выходе. Расчет производится итеративно до сходимости протяженности зоны цепей. Модель химических превращений предполагает расчет химических превращений малой «порции» материала при ее движении по осевой координате, которая связана с изменяющейся на различных участках скоростью, определенной в модели осевого движения. Для учета количества осевшего и улетевшего с «порции» материала используются результаты работы модели пылеуноса и пылеосаждения.

Последней моделью в расчете комплексной ММ ТВП является модель теплообмена, так как для ее расчета требуется информация о: количестве пыли в воздухе, ее уносе и осаждении в каждой секции; профиле высоты слоя материала; протекании химических реакций; количестве влаги и температуре материала на выходе из цепной зоны; температуре газов факела и количестве несгоревшего топлива по длине факела. Результатом расчета данной модели является температурный профиль газа и материала по длине ТВП (рисунок 16).

По результатам расчета комплексной ММ ТВП вычисляется длина печи. Итерационный расчет осуществляется до тех пор, пока расчетная длина печи не совпадет с ее фактической длиной в пределах заданной погрешности. Корректировка осуществляется за счет изменения производительности печи.

В качестве основных допущений комплексной ММ ТВП следует выделить: отсутствие продольного перемешивания, вся влага

полностью испаряется к концу второй зоны, равномерное распределение температуры материала и газа в пределах поперечного сечения печи.

Полученные результаты моделирования были верифицированы на базе данных из научной литературы и на данных с исследуемого предприятия.

Оценка эффективности разработанной СУУ ТП, функционирующей в режиме советчика, выполнена методом имитационного моделирования на базе ММ процесса. Моделирование проводилось путем варьирования технологических параметров (расход материала, влажность и химический состав шихты, теплотворная способность топлива) в пределах эксплуатационных отклонений. Эффективность оценивалась по изменению степени протекания реакций спекания.

Результаты серии сценарных расчетов показали повышение степени извлечения глинозема на 0.6 %. Таким образом, данное положение считается доказанным.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В диссертации представлено решение актуальной научной задачи стабилизации теплового режима процесса спекания нефелинового концентрата с известняком в ТВП. В ходе выполнения работы достигнуты следующие научно-технические результаты:

1. На основе анализа существующих СУ ТВП определены актуальные проблемы и методы их решения: для стабилизации режима работы объекта предложено модернизировать существующую структуру АСУ ТП с переходом на СУУ ТП на основе комплексной прогнозной модели и экспертной базы правил.

2. Разработано и реализовано устройство для автоматического определения динамического угла откоса сыпучих материалов с использованием системы технического зрения (патенты на изобретения №2849726, №2849725).

3. Определены осевые параметры движения сыпучего материала в ТВП с учетом меняющейся ФРП в ОУ на разработанной физической модели: среднее время пребывания, измеряемое методом трассирующих частиц материала эксперимента окрашенных магниточувствительной краской, и высота слоя материала, измеряемая с

помощь комплекса измерительных устройств TOF50C. Проведено 11 экспериментов с различными типами ФРП.

4. Разработана и экспериментально верифицирована ММ влияния ФРП на осевые параметры движения сыпучего материала в ТВП, определяющая среднее время пребывания материала с погрешность не более 11.8 %, высоту слоя материала с погрешностью не более 14 %.

5. Теоретически обоснована, разработана и верифицирована комплексная прогнозная ММ процесса спекания нефелинового концентрата с известняком в ТВП, рассчитывающая температурный профиль печи и процент извлечения глинозема из спека на основе зонального подхода, учитывающая: осевое движение материала, включая влияние изменения ФРП, унос и возврат пыли в горячий конец печи, горение факела, протекание химических реакций спекания и декарбонизации, а также теплообмен во всех зонах печи, включая цепную завесу. Модель верифицирована на промышленных данных из литературных источников (свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024662839, № 2024662736).

6. Разработана база правил и состояний объекта с применением теории нечетких множеств для управления в двух режимах работы: аварийный и нормальный.

7. Эффективность предложенной СУ на основе прогнозной ММ и экспертной базы правил для управления процессом спекания нефелинового концентрата в ТВП оценена с помощью методов имитационного моделирования на двух типах сценариев: отклонение значений возмущающих параметров и ситуации с различным текущим состоянием объекта. Рекомендации СУ позволили стабилизировать режим работы ТВП и повысить степень извлечения глинозема более чем на 0.6 %.

Направлением дальнейшего развития методов повышения уровня управления технологическим спеканием нефелинового концентрата с известняком в ТВП может быть разработка модели предиктивного управления для снижения роли оператора в управлении процессом и выработки управляющих воздействий в автоматическом режиме.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Публикации в изданиях из Перечня ВАК:*

1. Федорова, Э.Р. Современные подходы в автоматизации и управлении трубчатыми вращающимися печами/ Э.Р. Федорова, **В.В. Моргунов** // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2024. - №11. - с. 9-18. DOI: 10.25791/asu.11.2024.1540.

2. Федорова, Э.Р. Алгоритм расчета математической подмодели цепной зоны трубчатой вращающейся печи для спекания нефелинового концентрата с известняком на производстве глинозема / Э.Р. Федорова, **В.В. Моргунов** // Инженерный вестник Дона. – 2026. – № 2. – 17 с.

*Публикации в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus:*

3. Fedorova, E.R. Effect of variation of internal diameter along the length of a rotary kiln on material movement/ E.R. Fedorova, **V.V. Morgunov**, E.A. Pupyshcheva// Non-ferrous Metals. - 2024. - № 1. - PP. 28-34. DOI: 10.17580/nfm.2024.01.05.

4. Fedorova, E. Review: Axial Motion of Material in Rotary Kilns/ E. Fedorova, **V. Morgunov**, K. Lobko, E. Pupyshcheva// Eng. – 2025. – Vol. 6, Issue 6. – p. 106. DOI: 10.3390/eng6060106.

*Патенты/свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:*

5. Патент на изобретение № 2849725 Российская Федерация, МПК G01B 5/24 (2006/01), G01N 33/24 (2006/01). Устройство для определения динамического угла естественного откоса сыпучего материала и толщины активного слоя в режиме качения. Заявка № 2025116627: заявл. 17.06.2025: опубл. 28.10.2025 / Э.Р. Федорова, **В.В. Моргунов**; заявитель/патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 11 с.: ил.

6. Патент на изобретение № 2849726 Российская Федерация, МПК G01B 11/26 (2006/01), B65G 65/30 (2006/01). Устройство для определения степени удержания сыпучего материала на подъемнике.

Заявка № 2025120611: заявл. 25.07.2025; опубл. 28.10.2025/ Э.Р. Федорова, **В.В. Моргунов**; заявитель/патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 12 с.

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024662839 Российская Федерация. Программа для расчета параметров осевого движения материала в трубчатой вращающейся печи. Заявка № 2024661429: заявл. 14.05.2024; опубл. 30.05.2024/ Э.Р. Федорова, **В.В. Моргунов**; заявитель/правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 13,4 КБ.

8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024662736 Российская Федерация. Программа для расчета параметров поперечного движения материала в трубчатой вращающейся печи. Заявка № 2024660560: заявл. 14.05.2024; опубл. 30.05.2024/ Э.Р. Федорова, **В.В. Моргунов**; заявитель/правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 31,4КБ.

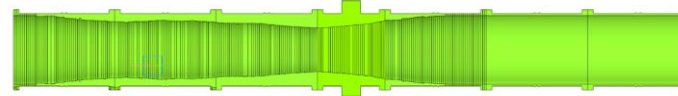
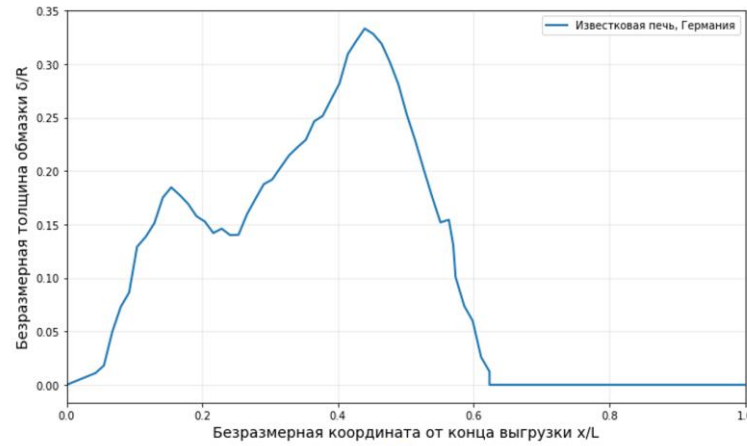
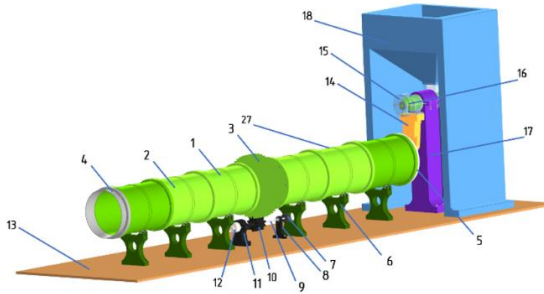


Рисунок 4 – Барабан с реалистичным типом геометрии (Б.10)

Рисунок 2 – Физическая модель осевого движения материала в ТВП

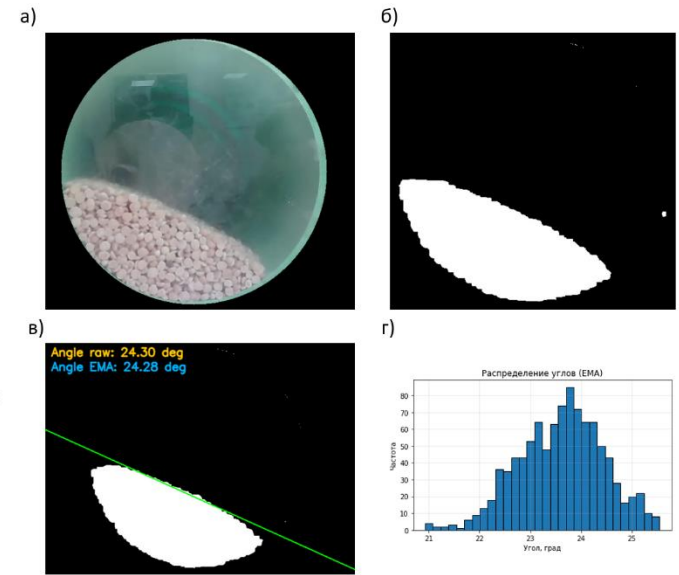
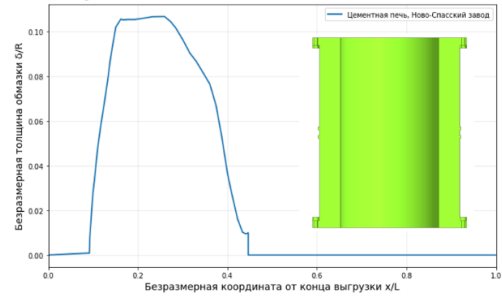
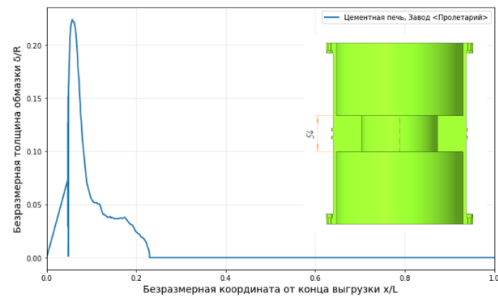


Рисунок 6 – Определение угла динамического откоса с помощью системы технического зрения

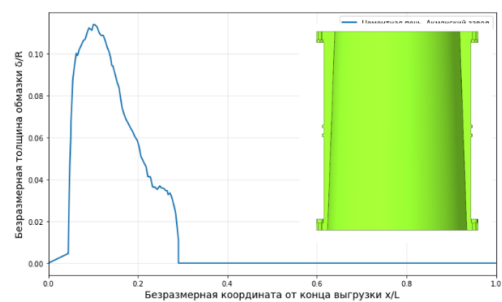
**Тип «Прямая»**



**Тип «Кольцо»**



**Тип «Сужающаяся»**



**Тип «Реалистичная»**

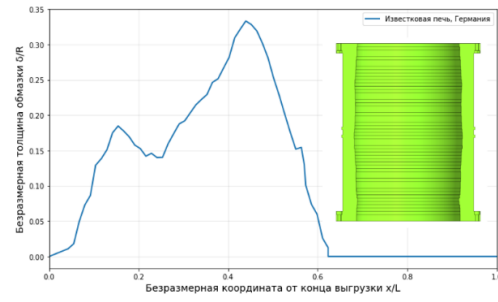


Рисунок 3 – Типы геометрии физической модели имитирующих ФРП реальной печи

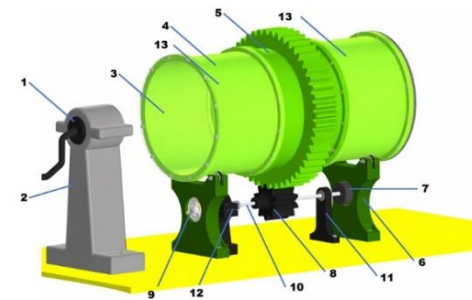


Рисунок 5 – Устройство для автоматического определения динамического угла откоса материала



Рисунок 7 – Определение высоты слоя и среднего времени пребывания

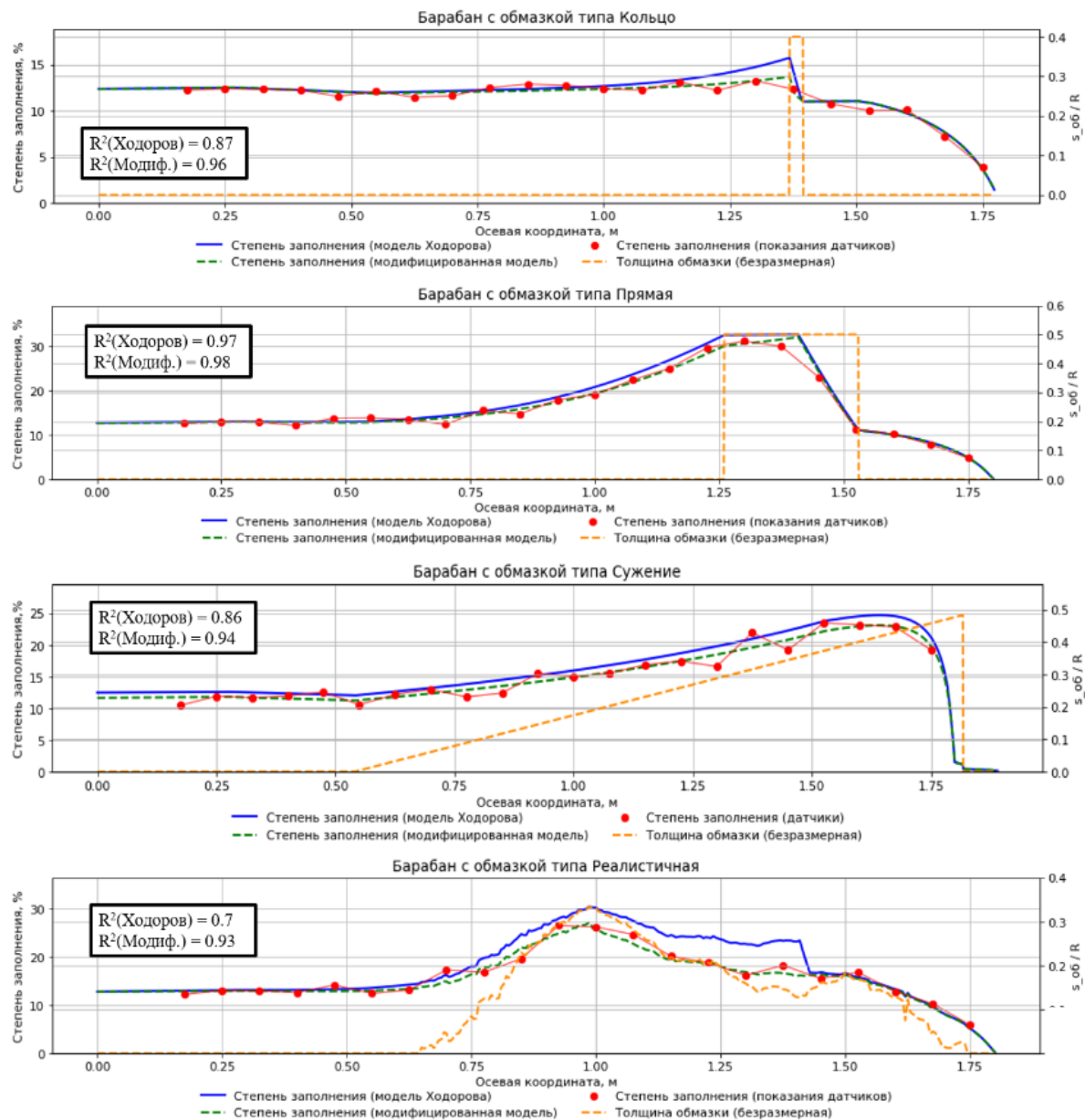


Рисунок 8 – Сравнение профилей степеней заполнения барабанов с различной ФРП (Б.6, Б.4, Б.5, Б.10) полученных экспериментально, рассчитанных по оригинальной модели Ходорова и по предложенной в работе модифицированной модели

Таблица 1 – Типы сегментов

Обозначение	Длина, мм	Внутренний диаметр, мм	Внешняя форма
<b>Сегменты без обмазки</b>			
T.0.1	270	190	Стандартный
T.0.2	180	190	Зубчатое колесо
<b>Тип обмазки «Прямая»</b>			
T.1.1	270	171	Стандартный
T.1.2	270	152	Стандартный
T.1.3	270	140	Стандартный
T.1.4	270	95	Стандартный
<b>Тип обмазки «Сужение»</b>			
T.2.1	270	190-170.6	Стандартный
T.2.2	270	170.6-151.1	Стандартный
T.2.3	270	151.1-131.7	Стандартный
T.2.4	180	131.7-118.8	Зубчатое колесо
T.2.5	270	118.8-104.5	Стандартный
<b>Тип обмазки «Кольцо»</b>			
T.3.1	270	190/114/190 (27)	Стандартный
T.3.2	270	190/152/190 (54)	Стандартный
T.3.3	270	190/114/190 (54)	Стандартный
T.3.4	270	190/114/190 (81)	Стандартный
<b>Тип обмазки «Реалистичный»</b>			
T.4.1	270	190-158.6	Стандартный
T.4.2	270	158.2-155.6	Стандартный
T.4.3	270	154.6-127	Стандартный
T.4.4	180	126.8-161.4	Зубчатое колесо
T.4.5	270	166.2-270	Стандартный

Таблица 2 – Конструкция барабанов

Обозначение	Порядковый номер сегмента от загрузки						
	1	2	3	4	5	6	7
Б.0	T.0.1	T.0.1	T.0.1	T.0.2	T.0.1	T.0.1	T.0.1
Б.1	T.0.1	T.0.1	T.0.1	T.0.2	T.0.1	T.1.1	T.0.1
Б.2	T.0.1	T.0.1	T.0.1	T.0.2	T.0.1	T.1.2	T.0.1
Б.3	T.0.1	T.0.1	T.0.1	T.0.2	T.0.1	T.1.3	T.0.1
Б.4	T.0.1	T.0.1	T.0.1	T.0.2	T.0.1	T.1.4	T.0.1
Б.5	T.0.1	T.0.1	T.2.1	T.2.2	T.2.3	T.2.4	T.2.5
Б.6	T.0.1	T.0.1	T.0.1	T.0.2	T.0.1	T.3.1	T.0.1
Б.7	T.0.1	T.0.1	T.0.1	T.0.2	T.0.1	T.3.2	T.0.1
Б.8	T.0.1	T.0.1	T.0.1	T.0.2	T.0.1	T.3.3	T.0.1
Б.9	T.0.1	T.0.1	T.0.1	T.0.2	T.0.1	T.3.4	T.0.1
Б.10	T.0.1	T.0.1	T.4.1	T.4.2	T.4.3	T.4.4	T.4.5

Таблица 3 – Среднее время пребывания материала

Тип барабана	Результаты эксперимента, мин	MRT (Модифицированная модель) мин	Погрешность %	Тип барабана	Результаты эксперимента, мин	MRT (Модифицированная модель) мин	Погрешность %
Б.0	31.4	33.5	6.7	Б.6	51.7	54.1	4.6
Б.1	34.7	33.3	4.0	Б.7	39.2	37.4	4.6
Б.2	42.6	46.2	8.5	Б.8	56.6	63.6	11.8
Б.3	62.5	58.6	6.2	Б.9	61.8	63.9	3.4
Б.4	151.3	169	11.7	Б.10	45.3	41.4	8.6
Б.5	140.4	128.3	8.6				



Рисунок 9 – Структура системы управления

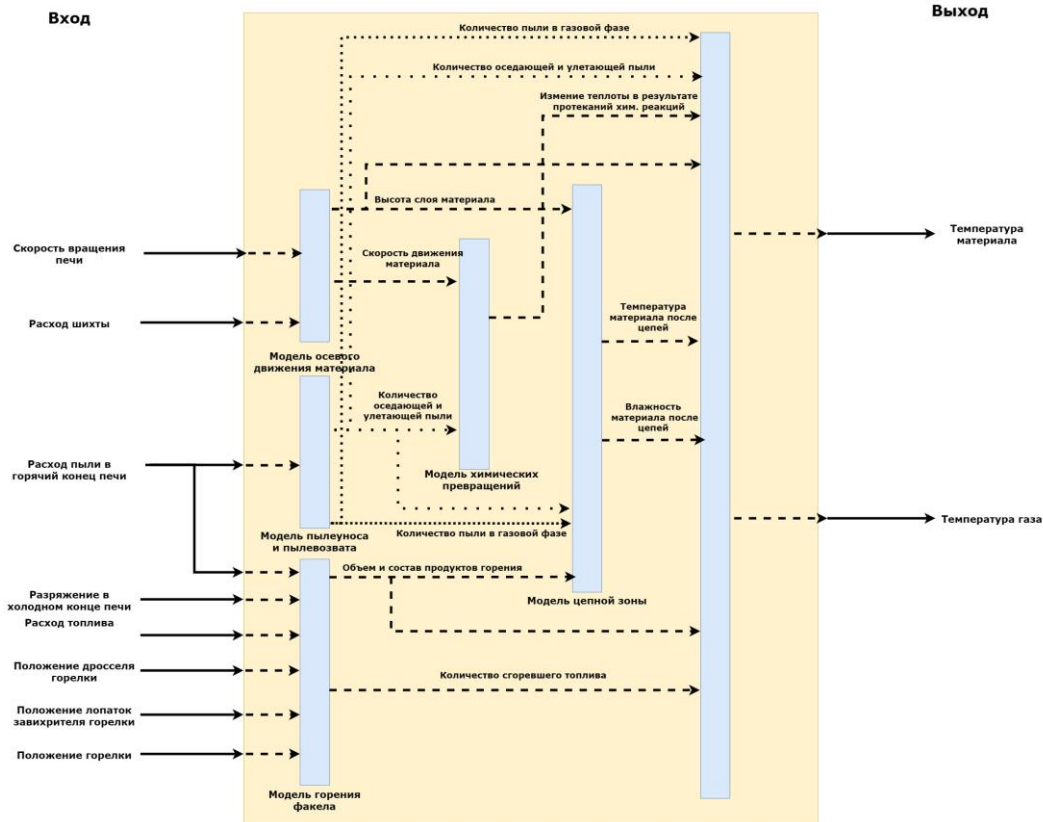


Рисунок 10 – Структура комплексной математической модели процесса спекания

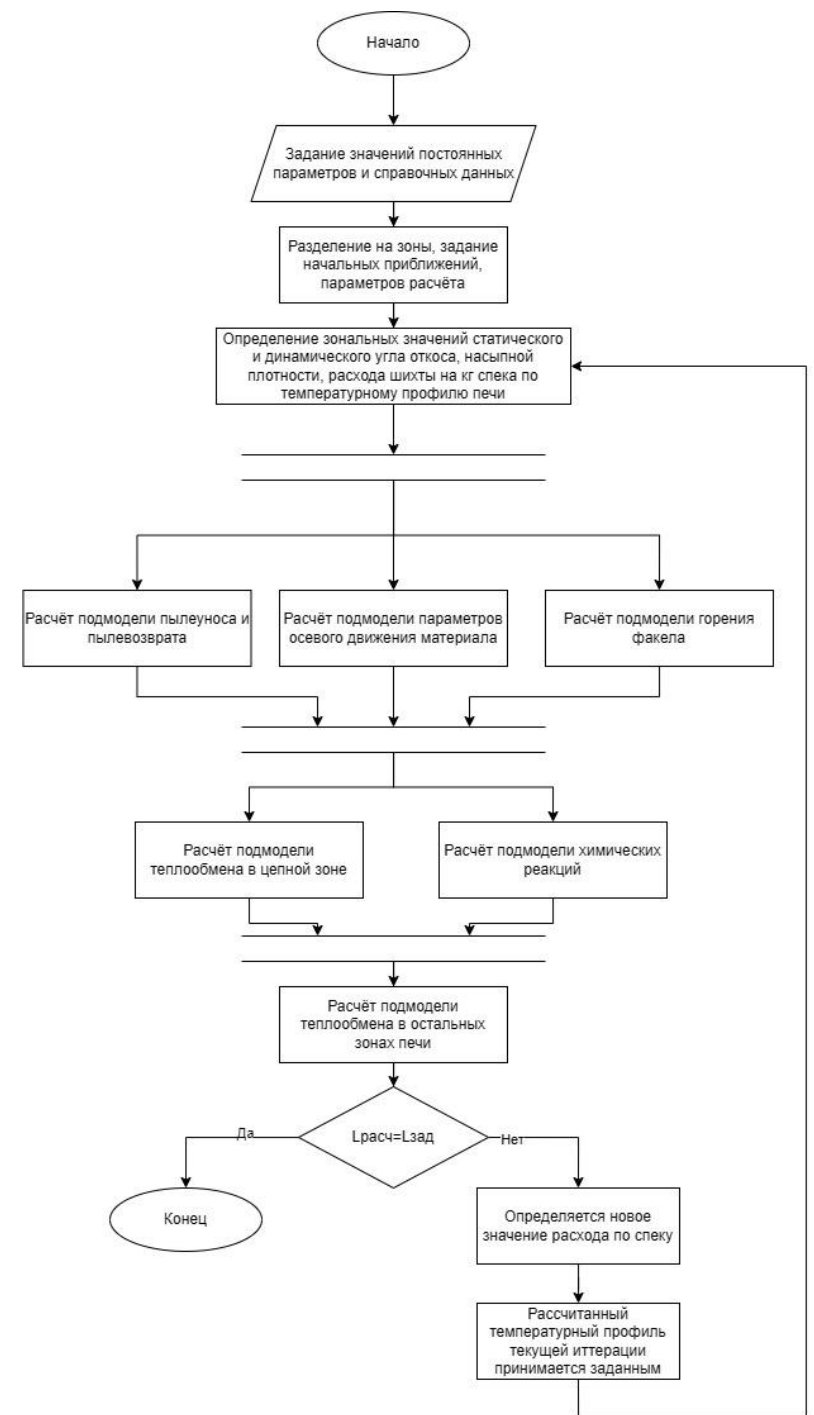


Рисунок 11 – Алгоритм расчёта комплексной математической модели процесса спекания

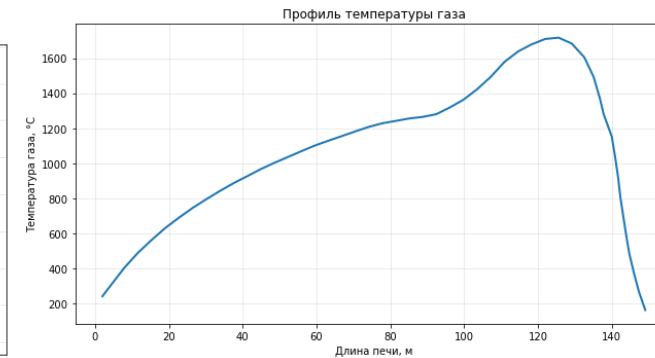
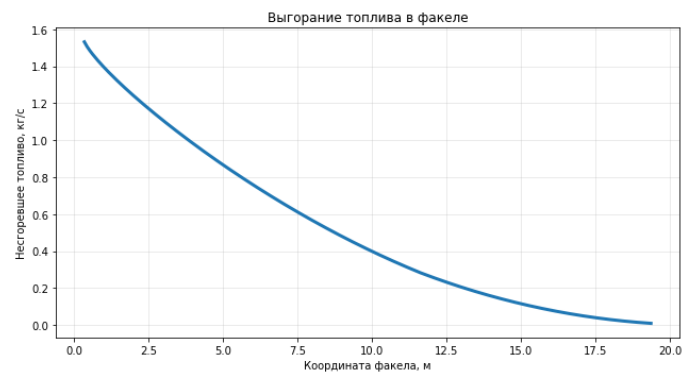
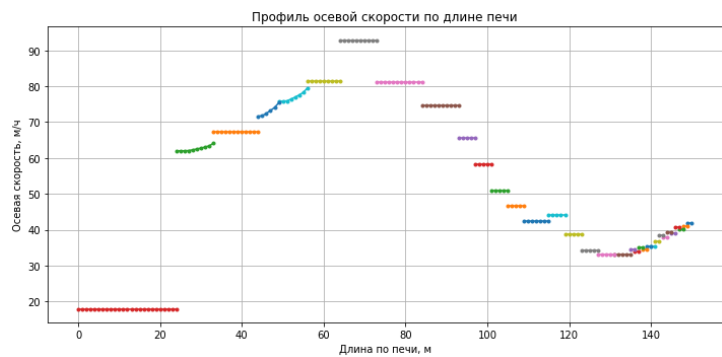
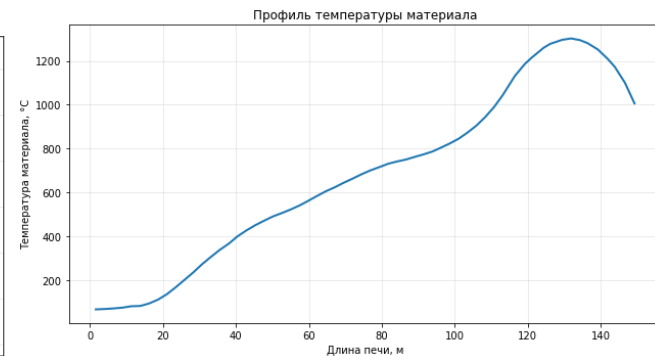
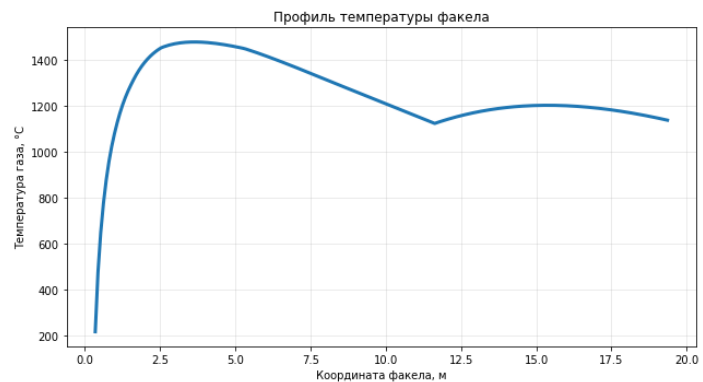
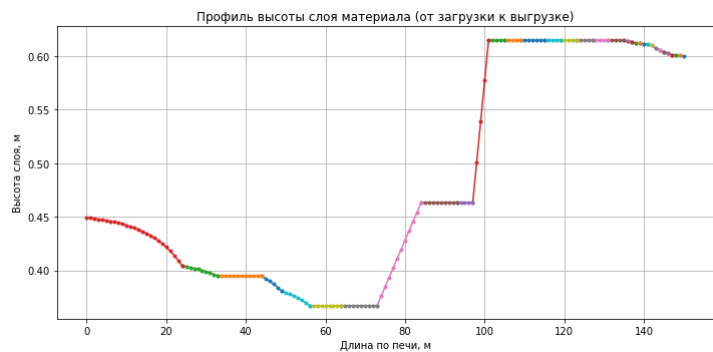


Рисунок 12 – Результат расчёта модели движения материала

Рисунок 14 – Результат расчёта модели горения факела

Рисунок 16 – Результат расчёта модели теплообмена

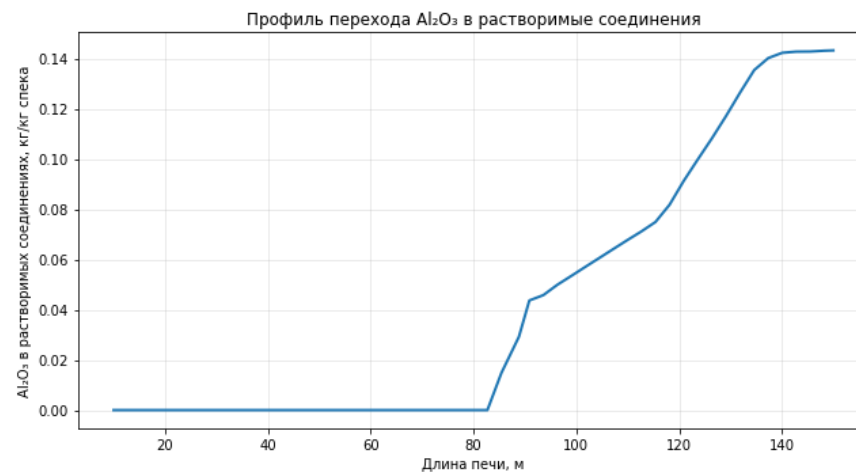
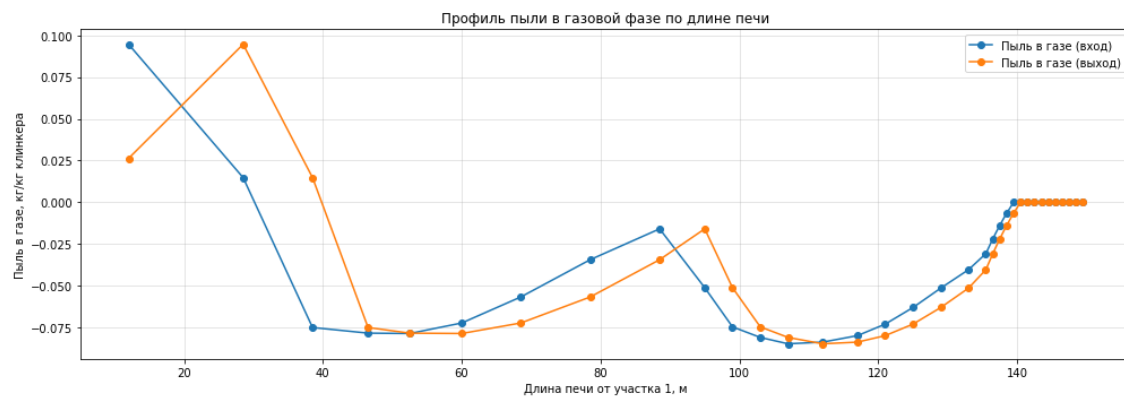


Рисунок 13 – Результат расчёта модели пылеуноса и пылевозврата

Рисунок 15 – Результат расчёта модели химических реакций