

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

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 технологическими процессами
и производствами

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
кандидат технических наук, доцент
Федорова Э.Р.

Санкт-Петербург – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТРУБЧАТЫМИ ВРАЩАЮЩИМИСЯ ПЕЧАМИ	11
1.1 Описание конструкции ТВП и протекающих процессов на примере печей ПГЗ	11
1.1.1 Физико-химические основы процесса спекания нефелино-известняковой шихты	11
1.1.2 Конструкция трубчатой вращающейся печи для спекания нефелино-известняковой шихты.....	12
1.1.3 Физико-химические преобразования по длине печи.....	16
1.1.4 Кольцеобразование и обмазка	21
1.2 ТВП для спекания нефелино-известняковой шихты как объект управления.....	24
1.2.1 Описание объекта управления.....	24
1.2.2 Программно-управляемые датчики для ТВП.....	29
1.2.3 Системы усовершенствованного управления для трубчатых вращающихся печей	35
1.2.4 Выводы по разделу	45
1.3 Поперечное движение материала в ТВП.....	46
1.3.1 Режимы движения материала	46
1.3.2 Пересыпающийся режим движения (rolling).....	47
1.4 Осевое движение материала в ТВП	49
1.4.1 Основные понятия	49
1.4.2 Эксперименты по определению высоты слоя материала	50
1.4.3 Эксперименты по определению скорости осевого движения материала.....	53
1.4.4 Эксперименты по определению времени пребывания материала	56
1.4.5 Математическая модель высоты слоя материала	58
1.4.6 Математическая модель осевой скорости движения материала.....	63
1.4.7 Математическая модель среднего времени пребывания материала.....	67
1.4.8 Выводы по разделу	70
1.5 Выводы по главе 1	70
ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИИ ОБМАЗКИ НА ОСЕВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ДВИЖЕНИЯ СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА.....	72
2.1 Задачи, решаемые в данной главе.....	72
2.2 Методология эксперимента	72
2.2.1 Постановка задачи и условий физического моделирования	72
2.2.2 Конструкции физической модели	74
2.2.3 Критерии подобия физической модели	76

2.2.4 Выходные параметры физической модели.....	80
2.2.5 Форма рабочего пространства физической модели	84
2.2.6 Характеристики использованных материалов и параметры эксперимента	90
2.3 Математическое описание	90
2.4 Результаты	95
2.4.1 Высота слоя материала.....	95
2.4.2 Среднее время пребывания.....	99
2.5 Выводы по главе 2	100
ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОЙ ПРОГНОЗНОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА СПЕКАНИЯ НЕФЕЛИНОВОГО КОНЦЕНТРАТА С ИЗВЕСТНЯКОМ В ТВП	102
3.1 Структура комплексной прогнознoй модели.....	102
3.2 Модель осевого движения материала в ТВП.....	106
3.3 Модель пылеуноса и пылевозврата в ТВП	111
3.4 Модель горения факела.....	116
3.5 Модель цепной зоны	130
3.6 Модель химических превращений.....	151
3.7 Модель теплообмена	160
3.8 Выводы по главе 3	169
ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПРОГНОЗНОЙ МОДЕЛИ И ЭКСПЕРТНОЙ БАЗЫ ПРАВИЛ	171
4.1 Система управления	171
4.1.1 Описание структуры.....	171
4.1.2 Целевые и управляющие параметры.....	172
4.1.3 Степень принадлежности целевых параметров	178
4.1.4 Оценка состояния зоны печи	181
4.1.5 Определение управляющего воздействия	186
4.1.6 Аварийный режим работы	186
4.1.7 Оценка эффективности предлагаемой системы управления.....	187
4.2 Выводы по главе 4	189
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	190
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	192
ПРИЛОЖЕНИЕ А Анализ экспериментов, представленных в литературе по теме моделирования осевого движения материала	205
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Справочные данные для комплексной модели.....	215
ПРИЛОЖЕНИЕ В Акт о внедрении результатов диссертации.....	227

ПРИЛОЖЕНИЕ Г Патенты на изобретения	228
ПРИЛОЖЕНИЕ Д Свидетельства на программу для ЭВМ.....	230
ПРИЛОЖЕНИЕ Е Перечень ситуаций в аварийном режиме работы системы	232

ВВЕДЕНИЕ

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 прогнозных моделей ОУ, что позволит стабилизировать температурный профиль печи и повысить степень извлечения глинозема.

Степень разработанности темы

Значительный вклад в развитие моделирования и управления процессами, протекающими в мокрых ТВП, внесли следующие ученые: И.Л. Талмуд, В.П. Почивалов, О.Н. Захаржевский, В.А. Корчевский, Ф.Н. Строков, Н.И. Влодавец, Х.А. Бадальянц, 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: К.Е. Peray, А.А. Boateng, Н. Henien, J. K. Brimacombe, А.Р. Watkinson, Ashish Agrawal, P.S. Ghoshdastidar, J. Mellmann, W.C. Saeman, Н. Kramers, Р. Crockewit, J. Perron, R.T. Bui, E. Lebas, A. Chatterjee, P.K. Mukhopadhyay, S.M. Zanolli, С. 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

- 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, Приложение Г);

- 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, Приложение Д);

- 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, Приложение В).

Методология и методы исследований

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:

1. XXXI Международный научный симпозиум «Неделя горняка» (30 января - 03 февраля 2023 года, Москва).

2. Научная конференция студентов и молодых ученых «Полезные ископаемые России и их освоение» (25-28 апреля 2023 года, Санкт-Петербург).

3. XIX Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (21-27 мая 2023 года, Санкт-Петербург).

4. XII форум вузов инженерно-технологического профиля Союзного государства (23-27 октября 2023 года, Минск).

5. Научная конференция студентов и молодых ученых «Полезные ископаемые России и их освоение» (21-25 апреля 2024 года, Санкт-Петербург).

6. XX Всероссийская конференция-конкурс студентов выпускного курса и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования» (01-07 декабря 2024 года, Санкт-Петербург),

7. XCIV International scientific conference «Technical and Natural science (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 публикаций.

Публикации

Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 4 печатных работах (пункты списка литературы № 59, 60, 88, 89), 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, в 2 статьях в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus. Получены 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ (пункты списка литературы № 51, 52, Приложение Д) и 2 патента на изобретение (пункты списка литературы № 44, 45, Приложение Г).

Структура диссертации.

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.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТРУБЧАТЫМИ ВРАЩАЮЩИМИСЯ ПЕЧАМИ

1.1 Описание конструкции ТВП и протекающих процессов на примере печей ПГЗ

1.1.1 Физико-химические основы процесса спекания нефелино-известняковой шихты

Основной целью процесса спекания является образование растворимого алюмината натрия $(Na, K)_2O \cdot Al_2O_3$ (NA) и нерастворимого двухкальциевого силиката $2CaO \cdot SiO_2(C_2S)$, что позволит на последующем этапе выщелачивания разделить глинозем и кремний. Согласно работам [15; 35; 39] для достижения данной цели на каждый моль SiO_2 в шихте должно приходиться 2 моля CaO , а на моль R_2O – один моль Al_2O_3 . Эти соотношения описываются известковым модулем ($M_{изв}$) и щелочным модулем ($M_{щел}$) соответственно. Модули рассчитываются по формулам (1.1-1.2) [10]:

$$M_{изв} = \frac{CaO}{SiO_2} \quad (1.1)$$

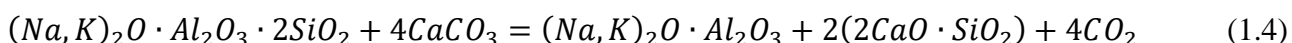
$$M_{щел} = \frac{Na_2O + K_2O}{Al_2O_3} \quad (1.2)$$

Также в работе [48] впервые отмечается критерий С (1.3):

$$C = \frac{SiO_2}{Al_2O_3} \quad (1.3)$$

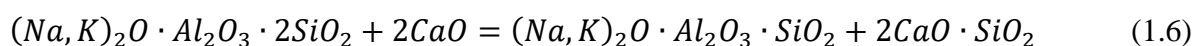
Который не должен превышать соотношение 1.55, так как нарушение данного соотношения не позволяет поднять температуру материала в печи до необходимой величины, обеспечивающей протекание физико-химических превращений [48].

При этом основную реакцию спекания можно записать следующим образом (1.4):



Данная реакция представляет собой комплекс последовательно-параллельных твердофазных реакций [32; 35]. При протекании твердофазных реакций сначала в реакциях принимают участие только атомы, расположенные на поверхности соприкасающихся веществ, для продолжения реакции нужна взаимная диффузия атомов (ионов) через образовавшийся утолщающийся слой продукта реакции. Следовательно, кинетика образования нового соединения определяется как интенсивностью межкристаллической диффузии, так и скоростью собственно химического взаимодействия.

Реакция (1.4) протекает стадиями [61–63]. На первой стадии происходит разложения известняка (1.5) и образование промежуточного продукта (1.6) – однокремнистого алюмината натрия $(Na, K)_2O \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2$ (NAS).

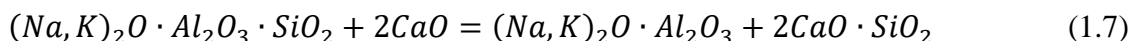


Разложение известняка по реакции (1.5) протекает в виде реакционного фронта, перемещающегося от внешней поверхности частицы к её центральной части, при этом зона

превращения имеет малую толщину [93]. Характер и скорость данного процесса в значительной степени определяются как химическим составом материала, так и его физико-структурными особенностями [18; 41].

Согласно результатам [33], процесс декарбонизации известняка может лимитироваться скоростью химического взаимодействия, процессами теплообмена частиц со средой, подводом тепла теплопроводностью, отводом CO_2 из зоны реакции посредством диффузии и изменением поверхности диссоциирующих частиц.

При дальнейшем повышении температуры протекает реакция (1.7) с образованием NA .



Помимо химического состава на качество спека большое влияние оказывает температурный режим печи и тонина помола шихты [4; 69]. Скорость твердофазных реакции значительно возрастает при уменьшении размера частиц шихты, так как возрастает суммарная реакционная поверхность. При этом толщина продуктов реакции будет значительно меньше влиять на скорость протекания реакции, что способствует её более полному завершению. Повышение температуры спекания позволяет увеличить скорость взаимодействия нефелина с известняком. При повышении температуры до образования жидкой фазы позволяет повысить степень извлечения глинозема из спека, однако с появлением жидкой фазы и оплавлением спека ухудшается другое важное свойство спека – пористость, что приводит к снижению степени извлечения глинозема. Под пористостью спека понимается процентное отношение объема пор к общему объему спека. Значение пористости должно находиться в диапазоне 20-30 % [6; 15].

На степень извлечение глинозема и температуру площадки спекообразования также влияет наличие Fe_2O_3 . Наличие данной примеси приводит к недоизвлечению глинозема и щелочей вследствие образования соединений с Al_2O_3 [47], а также к увеличению количества жидкой фазы в результате чего и сужается диапазон площадки спекообразования и снижается температура начала плавления спек [47].

1.1.2 Конструкция трубчатой вращающейся печи для спекания нефелино-известняковой шихты

Конструктивные и режимные характеристики ТВП ПГЗ на основе литературных данных представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Конструктивные и режимные характеристики печи ПГЗ (составлено автором)

Параметр	Значение	Источник
Конструктивные характеристики		
Длина печи, м	150	[68]
Диаметр кожуха печи, м	3.6x3.3x3.6	[68]
Наклон печи, %	3	[68]
Скорость вращения, об/мин	1.75-1.85	[68]
Высота подпорного кольца, м	0.6	[64]
Поверхность футеровки, м ²	1460	[68]
Поверхность цепной завесы, м ²	1020-1180	[2]
Вес цепей, т	60-65	[2]
Длина цепи, м	4.5	[1]
Диаметр звена цепи, м	0.025	[1]
Продольный шаг гирлянды, м	2.0	[1]
Продольный шаг навески, м	1	[1]
Поперечный шаг гирлянды, м	1.32	[1]
Плотность навески цепей	3.7	[1]
Вид топлива	Природный газ	[47]
Тип горелки	ВРГ	[47]
Диаметр сопла, мм	91	[37]
Скорость топлива на выходе из сопла, м/с	300	[37]
Производительность печи по спеку, т/ч	39-41	[68]
Массовый расход сухой шихты, т/ч	56.7-60.3	[68]
Пылевынос из печи, т/ч	13-15	[68]
Пылевозврат с горячего конца печи, т/ч	11-13	[68]
Коэффициент заполнения печи материалом	0.11-0.125	[68]
Расход топлива, м ³ /ч	6000-6600	[47][37]
Температура топлива, °С	10	[47]
Расход воздуха на горение, м ³ /ч	14050	[47]
Температура воздуха на горение, °С	80	[47]
Расход воздуха на транспорт пыли, м ³ /ч	19000	[47]
Температура воздуха на транспорт пыли, °С	65	[47]
Расход неорганизованного воздуха, м ³ /ч	46500	[47]
Температура неорганизованного воздуха, °С	12	[47]
Температура спека, °С	835	[47]
Температура отходящих газов, °С	210	[47]

Трубчатая вращающаяся печь для спекания нефелинового концентрата с известняком представляет собой массивный стальной цилиндр, наклоненный под небольшим углом к горизонту и приводимый во вращение с помощью венцевой шестерни и роликовых опор (рисунок 1.1, рисунок 1.2). Внутри печь футеруется огнеупорным кирпичом, тип и толщина которого варьируется по длине печи, в зависимости от ожидаемых температур на данном участке. В верхнюю часть печи наливом подается шихтовой материал. За печью со стороны подачи

материала установлен дымосос, который создаёт разрежение внутри печи. В нижнем конце расположена горелка, к которой подаётся топливо и воздух на горение. В качестве топлива может использоваться твердое, жидкое или газообразное, в зависимости от конструкции конкретной печи. В результате материал из-за наклона и вращения печи движется противотоком горячему газу от факела печи. В результате по оси печи формируется температурный профиль материала и газа. Место загрузки материала называется холодным концом печи, а место образование факела – горячим. По мере движения материал перемешивается, нагревается и претерпевает различные химико-физические превращения. В холодном конце печи также расположена цепная завеса, которая способствует теплообмену газового потока и материала и препятствует уносу пыли из других зон печи. Пыль, уносимая с отходящими газами, улавливается в системе газоочистки и возвращается в процесс в горячий конец печи (рисунок 1.3).



Рисунок 1.1 – Фото ТВП для спекания нефелиновой шихты с известняком (фото автора)



Рисунок 1.2 – Фото ТВП для спекания нефелиновой шихты с известняком (фото автора)

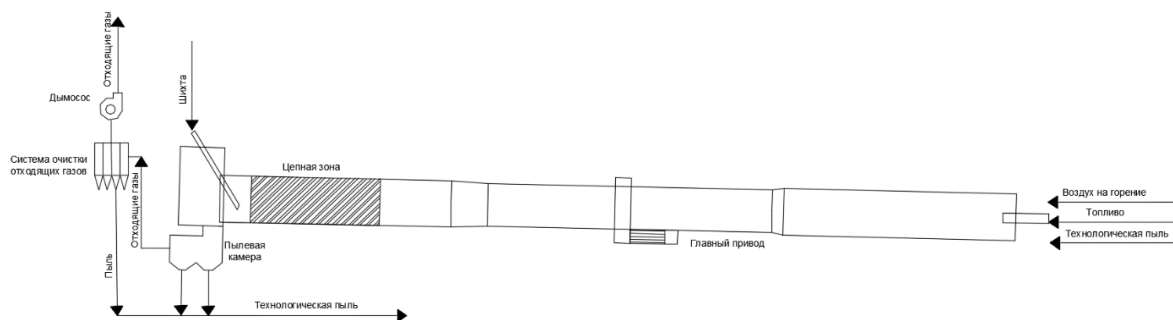


Рисунок 1.3 – Схематическое изображение материальных потоков в ТВП для спекания нефелинового концентрата с известняком (составлено автором)

В качестве устройства для сжигания топлива на момент проведения работы [68] использовалась мазутная форсунка, однако ввиду того, что на сегодняшний день печи на ПГЗ переведены на газовое топливо, недостаточного количества данных о температуре и длине мазутного факела в работе [68], было принято решение использовать более современные данные и сосредоточиться на модели газового факела. Согласно [47] на ПГЗ используется вихревая реверсивная горелка (ВРГ). Характеристики горелки были определены из книги [37].

Для описания цепной завесы воспользуемся методикой предложенной Абрамовым в работе [1] для описания конструктивных характеристик цепной зоны для любого способа навески. Всего существует два основных способа навески цепей: гирляндовый и свободновисящий. В рассматриваемом примере в данной работе используется гирляндовый способ навески. Чтобы однозначно описать конструктивные параметры цепной завесы необходимо указать следующие параметры [1]:

- $L_{ц}$ – длина цепной зоны, м;
- $D_{вн}$ – внутренний диаметр печи в цепной зоне, м;
- $l_{ц}$ – длина цепи, м;
- l_1 – поперечный шаг навески – расстояние между смежными точками подвески цепей по окружности печи, м;
- l_2 – продольный шаг навески – расстояние между смежными точками подвески цепей по образующей печи, м;
- l_3 – кратчайшее расстояние между смежными точками подвески цепей по длине печи, м;
- S_1 – поперечный шаг цепи (при гирляндовой навеске) – расстояние между точками подвески одной цепи по окружности печи, м;
- S_2 – продольный шаг цепи (при гирляндовой навеске) – расстояние между точками подвески одной цепи по образующей печи, м;
- $d_{ц}$ – диаметр звена цепи, м.

При навеске свободно висящими концами $l_1 = S_1$ и $l_2 = S_2$. При гирляндовой навеске цепей $l_2 = l_3$. Значения данных параметров описывающее навеску цепей для ТВП ПГЗ представлено в таблице 1.1.

1.1.3 Физико-химические преобразования по длине печи

Как уже было рассмотрено ранее, материал по мере движения нагревается и претерпевает физико-химические преобразования, наиболее значимые из которых протекают по реакциям, рассмотренным в подразделе 1.2.1. Однако следует подробно рассмотреть, как именно изменяется состав материала по мере продвижения по печи, какую роль в этом играет пылеунос и пылевозврат и как изменяются физические свойства материала, влияющие на скорость его продвижения по оси ТВП. Характеристики шихтового материала, готового спека и пыли представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Характеристики шихты, пыли и спека печи ПГЗ (составлено автором)

Показатель	Значение	Источник
Шихта		
Влажность, %	28.7-29.0	[2]
Удельный вес, кг/л	1.775	[2]
Химический состав, %:		
П.П.П	26.6-27.0	[2]
Al ₂ O ₃	11.5-11.7	[2]
Na ₂ O	7.1-7.2	[2]
CaO	32.5-32.8	[2]
SiO ₂	17.7-17.9	[2]
Fe ₂ O ₃	1.6-1.7	[2]
MgO	0.9	[2]
SO ₃ +TiO ₂ +P ₂ O ₅	0.45	[2]
Ситовый анализ (+ 0.085 мм), %	8-10	[2]
Щелочной модуль	1.01-1.04	[2]
Известковый модуль	1.94-1.97	[2]
Пыль		
Влажность, %	0	[5]
П.П.П	22.14	[5]
Al ₂ O ₃	12.25	[5]
Na ₂ O	8.5	[5]
CaO	32.6	[5]
SiO ₂	19.2	[5]
Щелочной модуль	1.19	[5]
Известковый модуль	1.82	[5]
Средний диаметр частиц, м	50·10 ⁻⁶	[14]
Насыпная плотность пыли, кг/м ³	1100	[29]

Продолжение Таблицы 1.2

Показатель	Значение	Источник
Спек		
Химический состав, %:		
П.П.П	1-2	[2]
Al ₂ O ₃	15.9-16.2	[2]
Na ₂ O	9.8-10.0	[2]
CaO	44.2-44.5	[2]
SiO ₂	24.4-24.7	[2]
Fe ₂ O ₃	2.3-2.4	[2]
MgO	1.2	[2]
SO ₃ +TiO ₂ +P ₂ O ₅	0.6	[2]
Стандартное извлечение Al ₂ O ₃ , %	84-86	[2]

Печь разделяется на пять крупных температурных зон, в которых происходят определенные химические реакции. В работе [36] отмечается, что данное разделение весьма условно, так как из-за локальных перегревов реакции могут происходить в небольшом количестве на любом участке печи, что несколько противоречит выводу первой главы работы [1], в которой по результатам промышленных экспериментов отмечается отсутствие химических реакций в цепной зоне. Однако забегая вперед, следует сказать, что на текущий момент учесть локальные перегревы материала в моделях, предназначенных для управления технологическим процессом, не представляется возможным, так как решение такой задачи требует применения численных методов, что невозможно с учетом требований к времени расчёта модели. Поэтому в последующих главах данной работы принимается допущение, что в цепной зоне происходит только испарение жидкости, как и сказано в работе [1].

Зоны рассматриваются от холодного конца печи к горячему. Описание зон приведено в виде таблицы 1.3.

Таблица 1.3 – Характеристики зон печи ПГЗ (составлено автором)

Название	Описание	T _{материала} °С	T _{газа} °С	Протяженность
Сушки	Удаляется большая часть жидкости. Включает цепную зону	50 – 100	680 – 220	~ 18 м
Подогрева	Полностью удаляется оставшаяся влага	100-550	1200 – 680	~ 30 м
Кальцинация	Происходит разложение известняка	550 – 1200	1450 – 1200	~ 70 м
Спекание	Имеет наивысшую температуру. Происходят реакции спекания	1230 – 1300	1650 – 1600	~ 15 м
Охлаждение	Производится охлаждение материала	1300-800	700-1500	~ 17 м

После печи спек отправляется в барабанный холодильник для охлаждения до 180-240 °С [47].

Наиболее подробное исследование преобразования нефелино-известняковой шихты по длине печи было представлено в работах [5; 29; 30]. В данных исследования представлены данные по изменению химического состава шихты, фракционного состава, осаждению и уносу пыли в реальной печи, изменению насыпной плотности, скорости движения материала и степени заполнения печи, изменению фазового состава спека на основе кристалооптического анализа в различных сечениях печи. Наиболее важные для последующего математического моделирования и верификации данные, которые позже будут использованы в расчёте, представлены на рисунке 1.4.

На температурном профиле достаточно отчетливо различимы рассмотренные ранее зоны. Достаточно медленное повышение температуры в зоне сушки. Самая протяженная зона разложения известняка, оканчивающаяся сравнительно небольшим участком резкого повышения температуры до 1280 °С – зона спекания. С последующим снижением температуры материала в зоне охлаждения. На температурном профиле газа также видна зона факела с резким повышением температуры и последующим теплообмен газового потока с шихтовым материалом.

В результате воздействия температуры на материал протекают химико-физические превращения, которые будут отражаться на свойствах материала. Наиболее значимыми в контексте математического моделирования осевого движения будут являться: динамический и статический углы естественного откоса, насыпная плотность, расход материала. Их изменение определяет изменение скорости осевого движения материала на различных участках печи и высоту слоя (степень заполнения) печи.

Также в работе [29] наглядно представлены процессы испарения и декарбонизации шихты по мере движения в ТВП, а также изменение содержания растворимых соединений в шихте. Данные графики необходим для верификации и идентификации разработанной модели.

Характерным отличием печей для спекания нефелинового концентрата от большинства цементных печей является место возврата пыли. В большинстве случаев пыль возвращается в холодный конец печи, однако в случае процесса спекания нефелина пыль возвращается непосредственно в факел.

В работе [5] представлены результаты экспериментов по осаждению возвращаемой пыли в печь и её пылеуносу на ПГЗ. Печь разделяется на четыре участка: 0-43 м, 44-90 м, 91-107 м, 108-150 м. Для каждой укрупненной зоны опытным путём был определен процент от общего выноса пыли и характер изменения пылевыноса внутри зоны. Для первого участка сообщается, что пылевынос составляет 55-65% от общего пылевыноса печи, при этом пик достигается на 30-35 метре печи. Для второго участка отмечается, что пылевынос является равномерным и

составляет 10% от общего количества. Для третьего участка сообщается, что пылевынос составляет 25-30% от общего, а пик достигается на 92-97 метре печи. На четвертом участке пылевынос отсутствует.

Схожий подход использовался и для определения осаждения пыли. При осаждении пыли печь была разбита на следующие участки: 0-43 м, 43-92 м, 92-115 м, 115-150 м. В результате определено, что около 30% пыли оседает в зоне цепной завесы на первом участке, 40% оседает в зоне декарбонизации – второй участок и около 25% в третьей зоне – в зоне спекания. В четвертой зоне не происходит какого-либо оседания пыли так как пыль возвращается в печь до начала четвертой зоны. Примерно 5% пыли безвозвратно уносится и пролетает насквозь печи.

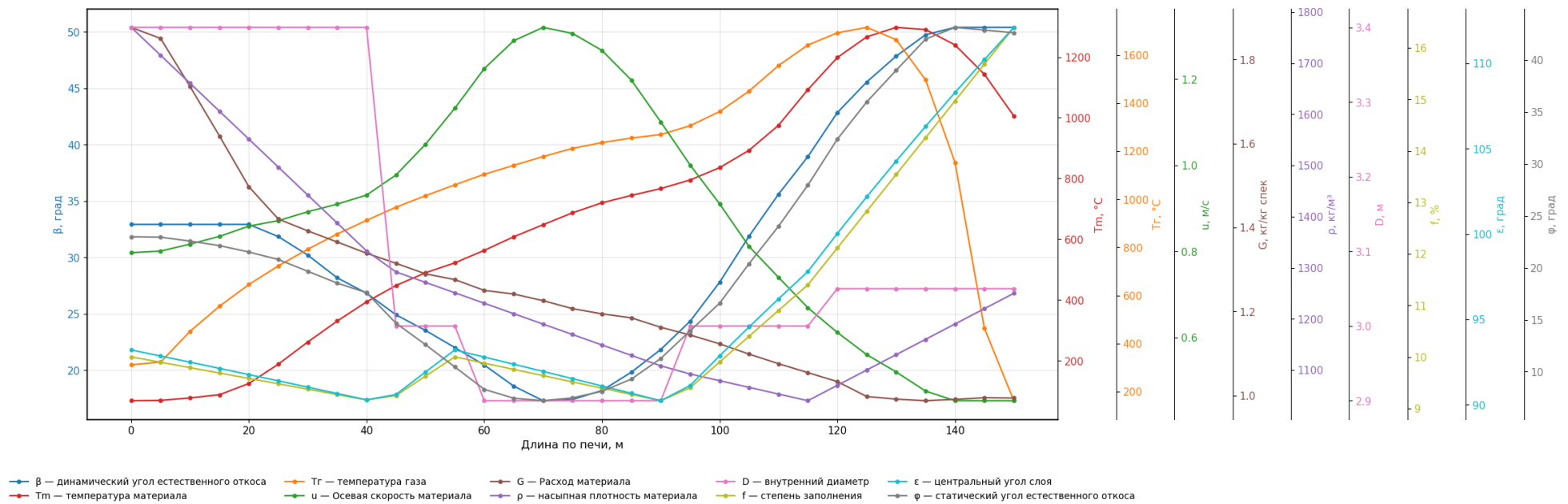


Рисунок 1.4 – Профили динамического угла естественного откоса, центрального угла, статического угла естественного откоса, расхода материала, температуры газа, температуры материала, внутреннего диаметра, осевой скорости и степени заполнения ТВП ПГЗ для спекания нефелинового концентрата с известняком на основе данных из литературных источников [29]

1.1.4 Кольцеобразование и обмазка

В таблице 1.2 приведён химический состав шихтового материала и пыли, а также щелочной и известковые модули. Как можно заметить из этих данных пылеунос материала является селективным, что подтверждается значительным отличием в составе и модулях между шихтовым материалом и пылью. Данное отличие является основной причиной возврата пыли в горячий конец печи, так как при возвращении пыли в холодный конец будут меняться модули шихты, что приведёт к образованию избыточного гарнисажа и колец внутри печи [68]. В работе [15] отмечается, что повышение щелочного модуля шихты может повлечь зарастание цепной зоны ТВП. Обмазка несёт положительный эффект дополнительно защищая футеровку в зоне факела от разрушения под действием высоких температур, тем самым продлевая компанию печи. Однако избыточное образование обмазки и колец в свою очередь оказывает возмущающее воздействие на печь: изменяется гидравлическое сопротивление печи из-за образования локальных сужений, изменяется распределение скорости газового потока по дли печи, изменяется скорость движения материала [43]. Более того избыточное формирование обмазки может привести к её последующему обрушению, которое, вероятно, повлечёт аварийную остановку печи и может спровоцировать обрушение футеровочных материалов. В научной литературе тема образования обмазки представлена весьма ограничено, а её влияние на параметры осевого движения практически не рассматривается.

Состав и механизм формирования колец отличен в зависимости от состава шихтового материала, топлива, конструкции печи и операционных условий. Более того сам механизм их формирования ещё до конца не изучен. Наиболее подробный обзор по теме кольцеобразования в цементных печах представлен в книге [34], в которой автор рассматривает 34 работы из иностранной и отечественной литературы, а также приводит выводы на основе своих собственных исследований о причинах их образования и способам предотвращения. Наиболее полно механизм образования, разрушения и восстановления обмазки в зоне спекания обсуждается в работе [54], однако в данном исследовании данная тема не рассматривается.

Уже существуют решения, которые позволяют определить профиль толщины обмазки и колец по температуре корпуса печи [118; 127]. Такая информация полезна для оператора, однако на момент написания диссертации в научной литературе не представлено математических моделей, которые бы учитывали наличие внутренних изменений диаметра печи из-за обмазки. На текущий момент описаны примеры использования «bloc-off region» метода для расчета влияния толщины обмазки на аэродинамический и тепловой режим печи [126; 154], однако в рамках литературного обзора не удалось найти математического описания влияния толщины и геометрии колец и обмазки на осевые параметры движения материала. Наиболее близкая работа

по данной теме [80], однако в ней практически не обсуждается математическое описание, а делаются практические выводы на основе проведенных экспериментов. Таким образом, на момент написания диссертации влияние толщины и геометрии обмазки и колец на осевые параметры движения сыпучего материала в трубчатых вращающихся печах является недостаточно рассмотренной темой в научной литературе. Поэтому одной из целей данной работы является устранение данного пробела, для чего далее следует рассмотреть работы, в которых представлено описание локализации колец и их геометрии.

Рассмотрим примеры локализации колец и обмазки внутри трубчатых вращающихся печей, представленные в научной литературе. На основе описания из книги [34] составлена краткая сводная таблица 1.4 с локализацией типов обмазки.

Таблица 1.4 – Типы колец (составлено автором)

Название	Локализация	Протяженность, %
Шламовые кольца	Шайба холодного конца печи	0-5
Шламово-солевые кольца	Цепная завеса	10-15
Материально-солевые кольца	Зона декарбонизации	35-65
Материально-клинкерные кольца	Зона спекания	70-80
Клинкерные (зольные) кольца	Зона спекания – зона охлаждения	80-100

В контексте печей ПГЗ наибольший интерес представляют кольца в зоне спекания и на границе с зоной охлаждения.

Далее следует рассмотреть более современные источники, которые не охвачены в книге [34]. В работе [126] представлен профиль обмазки для сорокаметровой цементной трубчатой вращающейся печи для численного моделирования движения газовой фазы.

В статье [75] рассмотрено образование зольных колец в известковых печах на твердом топливе. Типы, представленные в статье сведены в таблицу. В таблицу не включались неустойчивые кольца, такие как пылевое зольное кольцо, которые самопроизвольно разрушаются.

В работе [54] представлено несколько экспериментально полученных профилей обмазки реальных цементных печей. Профили из работы [54] и работы [126] представлены в безразмерном виде на рисунке 1.5.

На рисунке 1.5 видно, что в печи может быть множество различных комбинаций и вариаций локализации обмазки и колец, что следует учесть при разработке конструкции физической модели.

Так, можно выделить четыре типа геометрии обмазки. Обмазка печи с геометрией типа «Прямая» (рисунок 1.6) характеризуется наличием достаточно продолжительного прямого участка без резких переходов.

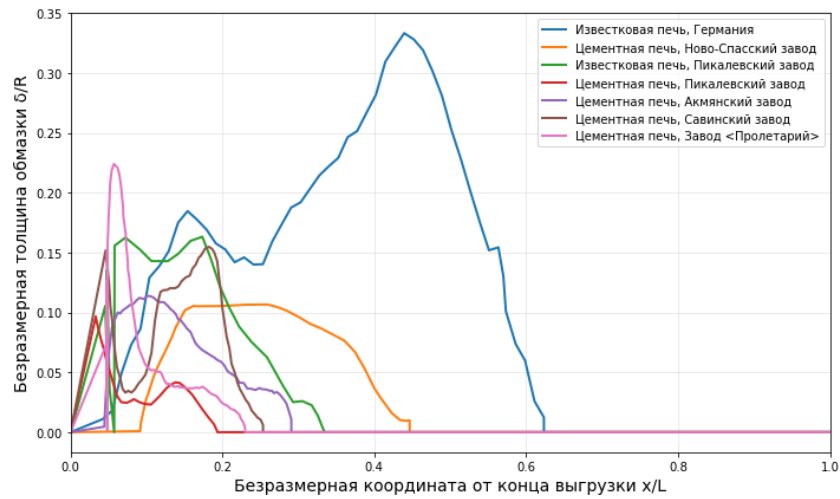


Рисунок 1.5 – Локализация обмазки в реальных ТВП по данным литературы [54; 126]

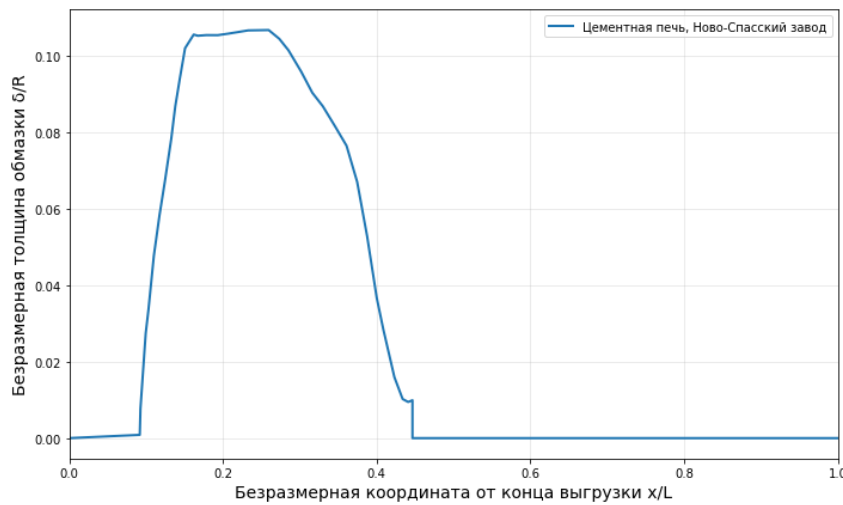


Рисунок 1.6 – Обмазка печи с геометрией типа «Прямая» [54]

Обмазка печи с геометрией типа «Сужающаяся» (рисунок 1.7) характеризуется наличием достаточно продолжительного прямого участка с практически линейным повышением толщины, а потом резким её падением до нуля.

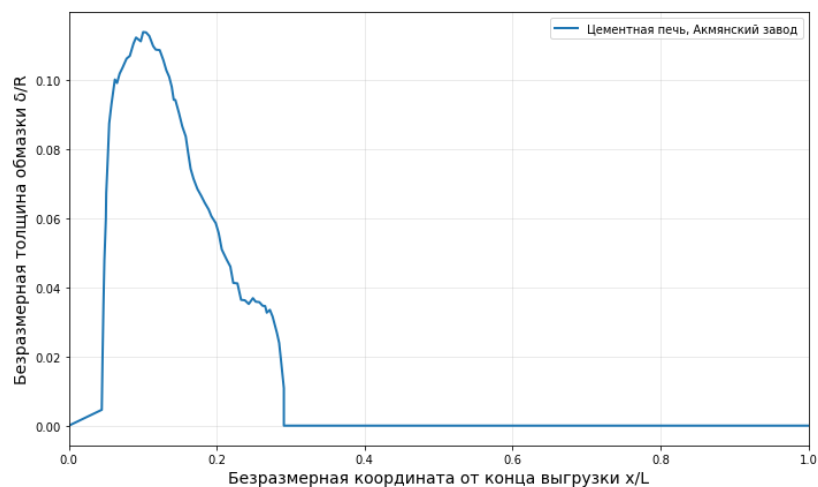


Рисунок 1.7 – Обмазка печи с геометрией типа «Сужающаяся» [54]

Обмазка печи с геометрией типа «Кольцо» (рисунок 1.8) характеризуется наличием достаточно короткого резко повышающегося участка, представляющего собой кольцо.

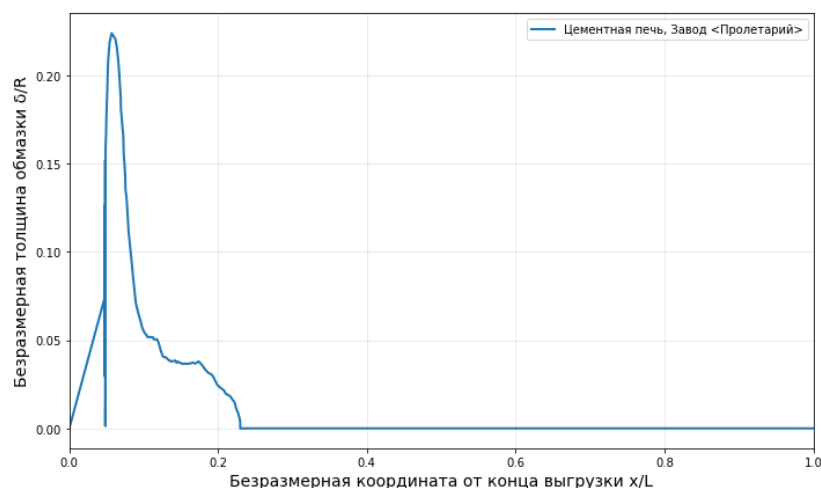


Рисунок 1.8 – Обмазка печи с геометрией типа «Кольцо» [54]

Обмазка печи с геометрией типа «Реалистичная» (рисунок 1.9) характеризуется нелинейным изменением толщины обмазки.

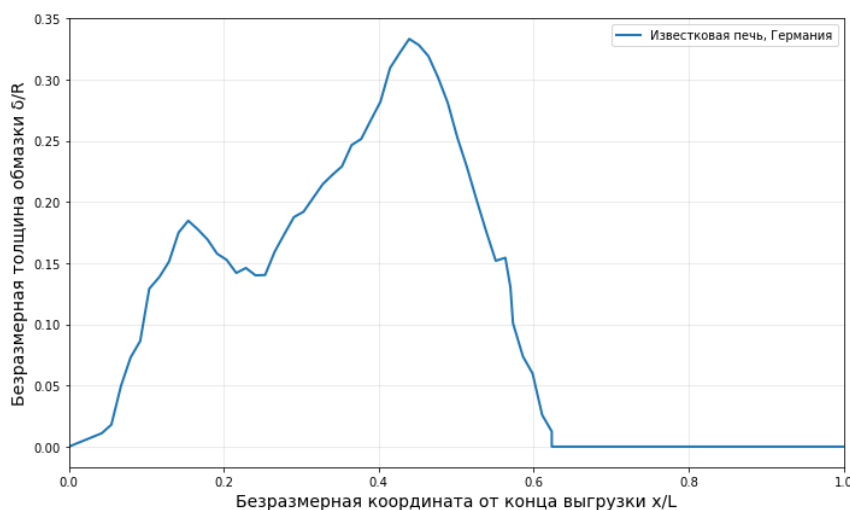


Рисунок 1.9 – Обмазка печи с геометрией типа «Реалистичная» [126]

1.2 ТВП для спекания нефелино-известняковой шихты как объект управления

1.2.1 Описание объекта управления

Следует рассмотреть основные технологические параметры в системах управления ТВП мокрого типа для спекания нефелиново-известняковой шихты. Для этого разделим их на 7 основные группы [60]. Выходные параметры – данная группа параметров показывает качество управления процессом, однако ввиду того, что данные параметры не измеряются непрерывно – они не участвуют в контурах управления, за исключением случаев использовать «мягких датчиков». Целевые параметры — это непрерывно контролируемые технологические величины, поддержание которых на заданном уровне рассматривается как основной способ обеспечения устойчивости и эффективности процесса обжига. Именно параметры данной группы, в силу

возможности их измерения в реальном времени и высокой чувствительности к изменениям теплового и газодинамического режима, в большинстве работ, рассматриваемых далее, используются в качестве регулируемых величин в контурах автоматического управления. Непрерывно контролируемые параметры – группа параметров, которые непрерывно контролируются и выводятся на экран оператора SCADA-системы. Показания данной группы оператор учитывает в процессе управления. Лабораторно контролируемые параметры – данные параметры не участвуют в оперативном управлении, так как определяются производственной лабораторией с задержкой 2-4 часа. Визуально контролируемые параметры фиксируются оператором и носят качественный характер. Неконтролируемые возмущающие параметры – отсутствуют способы прямого контроля. Управляющие параметры – это параметры, которые используются СУ для поддержания заданного значения целевых параметров (таблица 1.5).

Таблица 1.5 – Параметры ТВП как объекта управления (по данным автора)

№	Параметр	Тип	Единицы измерения
Выходные параметры			
1	Извлечение Al_2O_3	Выходной	%
2	Извлечение R_2O	Выходной	%
3	Количество спека	Выходной	т
4	Гранулометрический состав спека	Выходной	мм
Целевые параметры			
5	Температура отходящих газов	Целевой	°С
6	Содержание кислорода в отходящих газах	Целевой	%
7	Нагрузка на привод печи	Целевой	А
8	Содержание NO_x в отходящих газах	Целевой	%
9	Разряжение в головке печи	Целевой	Па
Целевые параметры			
10	Температура материала на выходе из печи	Целевой	°С
11	Температура газов после цепной зоны	Целевой	°С
Управляющие параметры			
12	Скорость вращения печи	Управляющий	об/мин
13	Расход шихтового материала	Управляющий	т/ч
14	Положение жалюзи дымососа (разряжение в «холодном конце» печи)	Управляющий	%
16	Расход пыли в горячий конец печи	Управляющий	т/ч
17	Положение дросселя горелки	Управляющий	-
18	Положение лопаток завихрителя горелки	Управляющий	-
19	Положение форсунки (горелки)	Управляющий	-
Непрерывно контролируемые параметры			
20	Температурный профиль кожуха печи	Контролируемый	°С

Продолжение Таблицы 1.5

№	Параметр	Тип	Единицы измерения
Непрерывно контролируемые параметры			
21	Температура материала в зоне кальцинации	Контролируемый	°С
22	Содержание СО в отходящих газах	Контролируемый	%
23	Расстояние от обреза до максимальной температуры корпуса	Контролируемый	м
24	Температура вторичного воздуха	Контролируемый	°С
25	Разряжение перед дымососами	Контролируемый	Па
26	Давление жидкого топлива перед горелками	Контролируемый	Па
27	Разряжение в пылеосадительной камере	Контролируемый	°С
28	Температура в пылеосадительной камере	Контролируемый	°С
29	Температура материала до цепной завесы	Контролируемый	°С
30	Температура материала после цепной завесы	Контролируемый	°С
31	Температура газа до электрофильтров	Контролируемый	°С
32	Температура газа после электрофильтров	Контролируемый	°С
33	Разряжение до электрофильтров	Контролируемый	Па
34	Разряжение после электрофильтров	Контролируемый	Па
35	Содержание смеси СО+Н ₂ +СН ₄ в отходящих газах	Контролируемый	%
36	Расход первичного воздуха	Контролируемый	м ³ /ч
37	Расход вторичного воздуха	Контролируемый	м ³ /ч
Лабораторно контролируемые параметры			
38	Влажность шихты	Лабораторно контролируемые	%
39	Ситовой состав	Лабораторно контролируемые	мм
40	Щелочной модуль шихты	Лабораторно контролируемые	-
41	Известковый модуль шихты	Лабораторно контролируемые	-
Визуально контролируемые параметры			
42	Цвет факела	Визуально контролируемые	-
43	Форма факела	Визуально контролируемые	-
44	Видимость в головке печи	Визуально контролируемые	-
45	Качество спека	Визуально контролируемые	-

Продолжение Таблицы 1.5

№	Параметр	Тип	Единицы измерения
Неконтролируемые возмущающие параметры			
46	Толщина футеровки	Возмущающий	м
47	Толщина обмазки	Возмущающий	м
48	Теплотворная способность топлива	Возмущающий	-
49	Гидравлическое сопротивление печи	Возмущающий	-
50	Состояние цепной зоны	Возмущающий	-
51	Температура окружающего воздуха	Возмущающий	°С

Трубчатые вращающиеся печи представляют собой многосвязный объект с распределенными параметрами и большим изменяющимся транспортным запаздыванием по различным каналам управления, а также большим количеством неконтролируемых или контролируемых только лабораторно возмущающих воздействий. В результате управляющие параметры, которые используются для стабилизации целевых параметров одной зоны вносят возмущения в другие зоны печи. Все это делает процесс управления печью сложным и во многом зависящим от профессионализма оператора.

Для ТВП одинаковой конструкции, технологии и состава шихтового материала не существует единых оптимальных значений технологических параметров. Для каждого агрегата оптимальные значения необходимо подбирать индивидуально, что обуславливается длительностью рабочей кампании, которая в свою очередь определяет степень износа футеровки, конструкцией цепной завесы, качеством работы сопутствующего оборудования и состоянием других переделов предприятия [42].

Следует подробнее рассмотреть возмущающие воздействия и их влияние на целевые параметры. Колебания физических свойств шихты, которые не скомпенсированы на входе печи, в итоге приводят к изменению скорости продвижения материала внутри печи [48]. Колебания во влажности шихтового материала приведут к нарушению режима работы в зоне сушки, что в результате приводит к налипанию материала на теплообменные устройства и повышению пылевыноса [48]. Колебания крупности тонины помола шихты также приводят к изменениям в пылевыносе. Все перечисленные случаи приведут к изменению скорости движения материала, что в свою очередь нарушает теплообменные процессы и приводит к ухудшению качества спека.

Значительные возмущения и ограничения на управляющие воздействия накладывают на образование настыва в печах спекания. Во-первых, образования настыва приводит к изменению скорости движения материала и, следовательно, к изменению его термической обработки, что сказывается на качестве спека. Во-вторых, образование колец уменьшает сечение печи ограничивает управление с помощью положения шиберов дымососа [126]. В-третьих, образование настыва может приводить к колебаниям расхода материала, так как некоторая часть материала в процессе движения расплавляется и прилипает к обмазке, а некоторая часть обмазки

откалывается и попадает в поток шихтового материала [48]. В-четвертых, образование неустойчивого слоя обмазки может привести к обрушению её значительной части, что, вероятно, станет аварийной ситуацией и потребует переходу на «тихий ход» и может повлечь остановку печи. Более того подобное обрушение может спровоцировать и локальное обрушение футеровки печи или ускорить процесс её разрушения.

Толщина обмазки в таблице 1.5 отнесена к неконтролируемым возмущающим параметрам, так как на сегодняшний день системы контроля толщины обмазки не получили широкого распространения на отечественных цементных и глиноземных заводах. Однако такие решения известны [118; 127].

Толщина футеровки относится к возмущающим параметрам, так как в ходе компании печи она может изменяться из-за износа.

Под состоянием цепной зоны понимаются изменения, вроде, образования шламовых колец или налипания материалы на теплообменные устройства [15].

Управляющие параметры печи имеют ряд ограничений. Изменение разряжения в «холодном конце» печи снижает экономичность процесса вследствие изменения количества неорганизованного воздуха [48], а также ограничивается внутренними сужениями печи. Расход топлива и технологической пыли сверху ограничивается условиями обеспечения стойкости футеровки, а снизу необходимостью обеспечения заданной производительности при заданном качестве спека [48].

На тепловой режим наибольшее влияние оказывает расход топлива. Поэтому при управлении оператору следует в большинстве случаев пользоваться другими управляющими параметрами. Более того в литературном обзоре работы [36] автор среди недостатков рассматриваемых систем управления относит к ним и управление с помощью расхода топлива.

Также следует отметить, что и управление с помощью скорости вращения печи носит весьма ограниченный характер, так как на большинстве предприятий отсутствует возможность задать конкретные обороты, а вместо этого присутствует несколько фиксированных скоростей вращения, одна из которых «тихий ход».

Необходимо подробнее рассмотреть вопрос использования геометрии факела в качестве управляющего параметра. В современных горелочных устройствах управление длиной и формой факела во многом реализуется за счёт создания и регулирования завихрения газоздушного потока, а также за счёт особенностей конструктивного исполнения горелки. Завихрение формируется посредством направляющих лопаток, завихрителей, тангенциальных каналов или закручивающих сопел, которые придают потоку вращательное движение вокруг продольной оси факела. Наличие закрутки приводит к образованию центральной рециркуляционной зоны, в которой стабилизируется пламя и интенсифицируются процессы смешения топлива с

окислителем. Изменение интенсивности завихрения позволяет целенаправленно влиять на геометрию факела. При увеличении степени закрутки возрастает турбулентность и скорость перемешивания, что способствует более быстрому выгоранию топлива и формированию короткого, расширенного факела. Напротив, ослабление завихрения приводит к снижению интенсивности смешения и удлинению факела, который становится более узким и протяжённым. Таким образом, степень завихрения является одним из ключевых параметров, определяющих распределение тепловыделения по длине печи.

Параметры «Нагрузка на привод печи» и «Содержание NOx в отходящих газах» являются одними из основных, которые использует оператор в своей работе, однако в отличие от остальных целевых параметров они не фиксируются на каком-то заданном уровне. По динамике изменения этих параметров оператор может оценить протекающие внутри объекта процессы: например, температура в зоне горения очень тесно связана с содержанием NOx в отходящих газах.

Параметр видимость в головке печи предполагает визуальную оценку оператора о состоянии зоны спекания, которая зависит от уровня свечения обмазки и материала, а также наличия пыления. Характеризует температуру зоны спекания [42].

Следует упомянуть труд [121], в котором помимо детального описания технологии и конструктивных особенностей агрегата представлена подробная информация по возможным управляющим и целевым параметрам и их корреляционной связи. В работе [121] также делается предложение по разработке экспертной системы на основе 27 состояний объекта управления – комбинаций состояний трех целевых параметров: температуры отходящих газов, температуры в зоне спекания, содержания кислорода в отходящих газах. Также в книге описаны 15 типов чрезвычайных ситуаций, для каждой из которой представлен алгоритм действий со стороны оператора трубчатой печи.

Идет активное обсуждение применения современных подходов в автоматизации для трубчатых вращающихся печей. Наибольшее количество работ посвящено обсуждению применения программно-управляемых датчиков и усовершенствованного управления (Advanced Process Control and Optimization; APC-O).

1.2.2 Программно-управляемые датчики для ТВП

Мягкий датчик относится к датчикам с косвенным измерением, его определение отражено в ГОСТ Р ИСО 15746-1-2016. Также необходимо разграничить понятия мягкого датчика и виртуального прибора. Понятие мягкого датчика означает математическую модель для вычисления параметров, которые нельзя измерить напрямую, а виртуальный прибор представляет собой программное средство для управления измерительными процессами, которое

симулирует функции реальных измерительных приборов и взаимодействует с физическими сенсорами для сбора и анализа данных. В последнее время данная технология активно обсуждается и внедряется на промышленных предприятиях, что позволяет рассчитывать параметры, которые невозможно измерять физическими способами, и в результате это открывает возможности для разработки новых контуров управления объектом. В контексте ТВП такими параметрами могут стать высота материала, скорость его движения или степень смещения.

Soft sensor – программная модель, которая использует нейронные сети или математические модели для вычисления переменных, которые невозможно измерить напрямую или процесс измерения дорогостоящий и сопряжен со значительными трудностями. Данная технология используется как способ получить новый измеряемый параметр. Далее параметр может просто предоставлять оператору дополнительные сведения о процессе в виде численного значения, в таком случае в структуре системы управления расчет мягкого датчика будет происходить на уровне SCADA-системы, так как он не будет участвовать напрямую в автоматическом управлении процессом. Если же параметр используется в контурах управления, то его расчет будет производиться иерархически на одном уровне с ПЛК.

Данная технология получения нового измеряемого параметра широко обсуждается в контексте применения для ТВП. Например, одним из перспективных направлений является внедрение в управление математических моделей по движению и смешиванию материалов в осевом и продольном направлении [76; 114]. Однако реализовать это весьма затруднительно, ввиду наличия теплообменных аппаратов внутри печи, изменения свойств материала в результате химико-физических превращений и образования обмазки. При появлении способа измерять осевые и поперечные параметры движения материала, такие как скорость, степень смещения, толщина активного слоя и т.д.

В работе [140] предложен метод автоматического измерения глубины материала в печи на основе анализа температурных полей, полученных с помощью установленных специальным образом термопар. Эксперимент проводился в лабораторной печи, однако сообщается, что данная технология может быть использована и при температуре до 1500 °С, так как термопары расположены в стальных трубках, что должно защитить их от быстрого разрушения под действием рабочих условий. В одно гнездо устанавливаются 5 термопар таким образом, что конец первой расположен в центре печи, а последней – внутри кожуха. Остальные три расположены так, чтобы измерять температуру материала на разной глубине. Такая конструкция позволяет получить температурное поле и измерять локальную высоту материала в выбранной точке на оси. Максимальная погрешность в сравнении с ручными измерениями составила 7%. Определение толщины материала в печи определяется за счет того, что профиль будет иметь U-образную форму, когда термопары погружены в материал. Более того данный метод позволяет

не только определить локальную толщину слоя материала, но и судить о толщине активного слоя и как следствие о перемешивании материала в поперечной области. Данный подход можно использовать при проведении лабораторных исследований для получения новых знаний о теплообмене внутри слоя материала в промышленных печах, а также об изменении свойств материала по мере протекания физико-химических превращений под действием температуры.

В работах [54; 125; 127] решается актуальная задача отслеживания образования колец из обмазки внутри трубчатой печи, при этом в указанных работах решение данной задачи реализовано различными способами. В исследовании [127] решение основано на преобразовании температурного профиля кожуха, который является контролируемым параметром в большинстве трубчатых вращающихся печей за счет тепловизионных камер, в пространственно-временную тепловую карту, которая отображает температурный профиль печи с течением времени. В работе [125] со стороны горелки устанавливается камера, которая позволяет наблюдать зону горения, в которой и происходит основной рост обмазки. Предварительная обработка изображения в работе [125] включала в себя реализацию скользящего окна, извлечение красного канала, гистограммную эквализацию, фильтрацию шума, применение оператора Собеля и медианную фильтрацию. Затем происходит преобразование изображения от полукруглой формы кольца к его линейному представлению, построение гистограммы яркости по вертикальной оси изображения, в которой пики сообщают о наличии кольца. Для определения пиков используется метод экспоненциального взвешивания и метод поиска локальных максимумов. После чего происходит бинарная классификация с помощью классификатора Random Forest, говорящая о том, содержит ли изображение пик. Значительным ограничением при использовании данных методов в качестве источника информации для систем управления является то, что они позволяют определить сам факт наличия колец, а также, в случае работы [127], отследить динамику их роста, но не позволяют определить их толщину. В работе [54] разработана методика расчёта толщины обмазки в зоне спекания по температуре корпуса печи. На основе описанных в работе расчётов составлена номограмма, которая позволяет определить профиль толщины покрытия. На основе полученных зависимостей и апробации на нескольких промышленных ТВП был предложен метод наращивания толщины обмазки, её устойчивости и борьбы со сколами с целью продления срока службы футеровочного покрытия, путём изменения скорости вращения.

В дополнение к тематике образования колец следует выделить работу, которая не попадет под понятие мягкого датчика, однако может быть эффективно использована оператором и внедрена на уровень SCADA-системы. В работе [143] предложен метод прогнозирования обрушения обмазки в виде количественной оценки вероятности на основе нечеткой логики и нейронных сетей. В качестве входных параметров используется ток двигателя. На первом этапе токовый сигнал двигателя проходит через предварительную обработку с помощью EMD

(Empirical mode decomposition) [102]. Это необходимо так как сигнал тока двигателя не является стационарным и имеет нелинейную природу. Данный метод позволяет разложить сложный сигнал на более простые компоненты –IMF (Intrinsic Mode Functions), каждая из которых соответствует различным частотным компонентам сигнала. Для последующего анализа выбирается информация только от четырех модовых функций: IMF3, IMF4, IMF5 и IMF6. Эти параметры представляют собой четыре входа для FIS (Fuzzy Inference System), которая на основе базы правил, представленных в работе, определяет вероятность обрушения обмазки. На основе уже фазифицированных данных обучается FNN (Fuzzy Neural Network), что позволяет системе работать в реальном времени. Дополнительно для оценки ситуации оператором предлагается контролировать такие рабочие параметры, как: температура в зоне обжига, температура клинкера на выходе, давление в головке печи

Подход, описанный в работе [102], может быть дополнен с учетом результатов работы [154]. В данном исследовании предложена итерационная методика расчета толщины колец внутри печи. На первом шаге по средствам одномерной модели теплопередачи вычисляется оценочная толщина колец, после чего данные о толщине покрытия вводятся в CFD (Computational fluid dynamics) модель, которая на основе входных параметров агрегата рассчитывает температуру внешней стенки печи. Рассчитанная температура сравнивается с измеренной с помощью тепловизионных камер, если ошибка превышает заданную, то расчет повторяется с корректировкой толщины слоя кольца. Для того чтобы снизить время расчета CFD модели авторы предлагают использовать метод blocked-off region, который позволяет «заблокировать» участки сетки, относящиеся к зоне обмазки и таким образом исключить их из расчета движения газов, но при этом рассчитывать их теплопроводность как твердого материала.

В отдельную группу работ по данной тематике можно выделить работы, посвященные мягким датчикам по определению температуры в различных зонах печи.

В работе [148] рассматривается мягкий датчик, позволяющий предсказывать температуру в зоне спекания на основе рабочих переменных процесса. Модель для расчета температура построена на основе данных с применение технологии DCGNet (Deep Convolutional Neural Network and Gated Recurrent Unit Network). На первом этапе проводится анализ с использованием метода PCA (Principal component analysis), что позволяет выделить несколько ключевых коррелированных факторов из общей массы переменных. После данные по выбранным переменным за определенный временной промежуток вводятся в DCGNet, которая в свою очередь состоит из трех модулей. Два из этих модулей работают параллельно друг другу и результатами своей работы создают входные данные для третьего модуля. Первый состоит из комбинации CNN (Convolutional neural network) и GRU (Gated recurrent unit). CNN используется для извлечения локальных пространственно-временных корреляций между переменными и для

сжатия данных, а GRU – для извлечения временные зависимости на основе уже извлечённых CNN признаков. Объединение производится в первом слое FC (Fully Connected Layer). При этом второй модуль, работающий параллельно с первым, состоит только из GRU, однако получает на вход только исторические данные температуры спекания, что позволяет выделить её динамические особенности во времени. Объединение обоих модулей производится в третьем модуле в виде второго слоя FC.

В работе [153] решается аналогичная задача, но уже для зоны кальцинации. Для уменьшения размерности данных и удаления избыточных переменных производится предварительная обработка данных с помощью методов ISOMAP (Isometric) и LLE (Local linear embedding). Для определения температуры используется нейронная сеть Elman.

В отличие от рассмотренных выше исследований, существуют и другие подходы к созданию обучающей выборки для разработки мягких датчиков температуры различных зон ТВП. В работе [92] обучение нейронной сети производится не на исторических данных процесса, а по результатам численного CFD моделирования процесса. Для обучения используется нейронная сеть BPNN (Backpropagation Neural Network). В работе [142] набор данных сочетает как исторические производственные данные, так и данные полученные в результате CFD моделирования.

В последние пятнадцать лет очень популярным направлением исследования в контекст мягких датчиков является применение технического зрения и нейронных сетей для определения состояния пламени в зоне спекания на основе фото и видеоизображений факела. Например, можно выделить следующие работы.

В работе [84] предложен софт-сенсор состояния горения в трубчатой печи на основе анализа видеопотока пламени, ориентированный прежде всего на распознавание нестационарных переходных режимов, которые плохо диагностируются по одиночным изображениям и традиционным температурным измерениям. Авторы используют пространственно-временные признаки, извлекаемые из коротких видеоклипов, объединяя динамический текстурный дескриптор 3DBLBP (Three-Dimensional Block Local Binary Pattern) и структурный признак НОРС-ТОР (Histogram of Oriented Phase Congruency on Three Orthogonal Planes), устойчивый к задымлению и размытию. Показано, что такой подход позволяет более надёжно различать нормальный, переохлаждённый и переходный режимы горения на реальных промышленных данных и может рассматриваться как практичный видеобазированный софт-сенсор для задач контроля и управления ТВП.

В работе [141] разработан видеобазированный софт-сенсор температуры пламени в цементной трубчатой печи, основанный на обработке RAW-изображений CCD-камеры (CCD — Charge-Coupled Device), что позволяет сохранить линейную связь сигнала с интенсивностью

излучения и расширить динамический диапазон по сравнению со стандартными RGB-изображениями. Предложена улучшенная двухцветная пирометрия, в которой учитываются реальные спектральные характеристики цветковых фильтров камеры, а негрейность излучения пламени компенсируется за счёт аппроксимации монохроматической излучательной способности, измеренной спектрометром. Промышленные испытания на цементной печи показали хорошее согласие с измерениями инфракрасного пирометра при погрешности менее 2%, что подтверждает пригодность метода в качестве практического софт-сенсора температуры пламени.

В работе [149] предложен софт-сенсор для распознавания состояния горения в цементной ТВП на основе анализа изображений пламени, ориентированный на классификацию трёх типовых режимов: недожог, нормальное горение и пережог. Авторы используют комбинированный метод сегментации Otsu–K-means, где алгоритм Otsu обеспечивает грубое отделение фона, а K-means выполняет тонкое разделение пламени на радиационную зону, зону горения и высокотемпературную область. Из этих зон извлекается ограниченный набор простых цветковых и яркостных признаков, которые затем усредняются по временному окну в одну минуту для снижения влияния пульсаций пламени. Для распознавания состояния применяется метод опорных векторов SVM (Support Vector Machine), оптимизированный с помощью K-fold cross-validation, что позволяет работать с малой обучающей выборкой. Промышленные испытания показали, что модель корректно классифицирует 28 из 30 тестовых случаев, что подтверждает применимость относительно простых методов сегментации и классического машинного обучения для построения практических софт-сенсоров состояния горения в трубчатых печах.

В работе [101] предложен софт-сенсор распознавания режимов работы ТВП по изображениям пламени, основанный на сочетании глубокого обучения, переноса обучения и механизма внимания, что ориентировано на решение проблемы малого объёма промышленных данных и высокой схожести классов. В качестве базовой модели используется предобученная на ImageNet глубокая остаточная сеть ResNet50 (Residual Network), дообучаемая на изображениях пламени, а для усиления информативных зон вводится координатный механизм внимания CA (Coordinate Attention), позволяющий одновременно учитывать каналные и пространственные признаки пламени. Дополнительно применяется функция активации Mish для снижения потерь полезной информации. Эксперименты на реальных данных цементной печи показали, что предложенная модель обеспечивает точность распознавания состояний «недожог – нормальный режим – пережог» на уровне 96,1%.

В работе [108] предложен видеобазированный софт-сенсор для прогнозирования состояния горения в трубчатой печи на основе последовательностей изображений пламени с использованием сверточно-рекуррентной нейронной сети CRNN (Convolutional Recurrent Neural

Network). В отличие от методов, основанных на ручном извлечении признаков, модель реализует сквозную обработку, автоматически извлекая пространственные признаки пламени с помощью и моделируя их временную динамику с помощью двунаправленной LSTM (Long Short-Term Memory). На вход подаются короткие временные окна последовательных изображений, по которым осуществляется прогноз будущего состояния горения (недожог, нормальный режим, пережог), что позволяет учитывать инерционность и динамику процесса. Испытания на промышленных данных показали среднюю точность прогнозирования 93,26%, подтвердив, что использование пространственно-временных зависимостей видеопотока пламени существенно повышает информативность софт-сенсора и делает CRNN перспективным инструментом для контроля состояния пламени.

1.2.3 Системы усовершенствованного управления для трубчатых вращающихся печей

Первые решения предполагали использование нескольких контуров стабилизации: расхода пульпы в печь, тяговый режим печи, профиля заполнения и др. [38; 57], а также нескольких контуров по отклонению на базе общепромышленных регуляторов. Например, в [7] система управления представлена двумя отдельными контурами: первый на основе измерений температуры в горячем конце печи изменяет подачу топлива, второй на основе температуры после зоны сушки изменяет положение горелки для корректировки геометрии факела. Из-за многосвязности параметров процесса, большого транспортного запаздывания по различным каналам управления и отсутствия автономности регулирования изменение управляющего параметра одного контура приводит к возникновению возмущающих воздействий по другому целевому параметру.

Еще одним современным подходом является усовершенствованное управление технологическими процессами, усовершенствованное управление и оптимизация технологических процессов APC-O, например, на основе прогнозирующих моделей (ГОСТ Р ИСО 15746-1-2016). Такая стратегия позволяет эффективно управлять процессами, которые характеризуются высокой инерционностью, нелинейностью, неустойчивостью по некоторым контурам регулирования и многомерной связью. ТВП ко всему вышеперечисленному как объект управления также характеризуется параметрической неопределенностью и неопределенным запаздыванием по большинству каналов измерения, поэтому разработка системы управления на основе методов и решений усовершенствованного управления и оптимизации технологических процессов для ТВП – задача актуальная.

Подавляющее количество работ можно отнести к понятию MPC (Model Predictive Control, Управление на основе прогнозирующих моделей)

Данная технология предполагает использование прогнозирующей модели управления как одного из основных модулей системы управления. В качестве математической модели объекта управления может выступать, например, уравнения, описывающие физические закономерности, или же модель может быть получена на основе идентификации данных реальной установки, или на основе исторических и/или симулятивных данных с помощью методов машинного обучения [112]. Все эти случаи рассмотрены ниже в разделе данной статьи.

В [7] предложен способ управления процессом обжига клинкера во вращающейся печи, основанный на расчёте требуемого количества топлива через баланс полезного тепла. Метод учитывает инерционность печи и запаздывание между подачей сырья и поступлением материала в зону максимального теплоснабжения, поэтому входные параметры (влажность, состав сырья, температуры) усредняются и вводятся с временной задержкой. Полезное тепло разделяется на составляющие, соответствующие испарению влаги и процессу клинкерообразования, а расход топлива корректируется с учётом тепла, вносимого сырьём и воздухом. Для повышения достоверности контроля предлагается использовать совокупность косвенных параметров, характеризующих степень обжига (например, температура в зоне спекания и гранулометрия клинкера), и оценивать корректность показаний по их статистической взаимосвязи.

В [8] описан способ автоматического управления процессом обжига сырьевой смеси во вращающейся печи, направленный на повышение устойчивости режима и качества обжига. Управление основано на совместном использовании нескольких косвенных измерений: температуры материала в зоне подогрева, температуры отходящих газов, среднего размера кусков материала на выходе печи и вращающего момента приводного двигателя. Сигналы разделяются на высоко- и низкочастотные составляющие, что позволяет учитывать как быстрые, так и инерционные изменения процесса в зонах сушки, подогрева и спекания. Расход топлива и отходящих газов корректируется по обратным пропорциональным зависимостям от указанных параметров, а также с учётом их взаимного влияния, что обеспечивает стабилизацию теплового режима, снижение температурных колебаний и уменьшение удельного расхода топлива.

Однако подходы [7; 8] имеют значительные недостатки: некоторые параметры используемые в расчёте модели не контролируются промышленно, а использование для расчёта априорной информации о процессе не позволит использовать данный подход для непрерывного управления, а также высокое транспортное запаздывание, изменяющееся в зависимости от температурного профиля, не позволит эффективно производить корректировку коэффициентов модели по выходным параметрам процесса.

В [9] предложен способ управления процессом спекания материала во вращающейся печи, направленный на повышение точности регулирования теплового режима и качества спечённого продукта. В основе метода лежит косвенная оценка состояния процесса по совокупности

измерений температуры материала в различных зонах печи, температуры отходящих газов, концентрации кислорода, а также количества материала, проходящего через печь. Изменение расхода топлива и технологической пыли осуществляется с учётом выявленной неравномерности движения и слоя материала, возникающей из-за запаздываний и внутренних возмущений процесса. Такой подход позволяет компенсировать инерционность печи, снизить влияние запаздывания датчиков и обеспечить более устойчивое поддержание температуры в зоне спекания, что приводит к снижению брака и предотвращению аварийных режимов работы.

Большой интерес представляет работа [49], в которой управление реализовано по средствам трех контуров, в которых для расчёта уставки регулятора используются математические подмодели объекта. Так, первый контур представлен модельным блоком, в котором производится вычисление показателя качества спека, в частности степени извлечения Al_2O_3 на основе полиномиальной зависимости (1.8):

$$\alpha_{Al_2O_3} = a_0 + a_1 T_{\text{м.спек}} + a_2 T_{\text{м.декорб}} + a_3 C_{CaO} \quad (1.8)$$

где $T_{\text{м.спек}}$ – температура материала на выходе из зоны спекания, °С,

$T_{\text{м.декорб}}$ – температура материала в зоне декарбонизации, °С,

a_i – эмпирические коэффициенты полиномиальных зависимостей,

C_{CaO} – доля окиси кальция в шихтовом материале, безразмерный.

При этом $T_{\text{м.спек}}$ и $T_{\text{м.декорб}}$ измеряются непрерывно, а C_{CaO} раз в несколько часов. По рассчитанному значению изменяется уставка регулятору, стабилизирующему расход пыли в печь. Второй контур стабилизирует расход топлива с корректировкой по температуре газов после цепной завесы. Третий контур основывается на математической модели расчёта количества газов в печи, расчёт которой производится по данным о расходе топлива, содержании кислорода и углекислого газа. По результатам расчёта вырабатывается уставочное значение для регулятора разряжения в холодной головке с корректировкой по температуре отходящих газов. Из недостатков можно отметить, что предложенная ММ качества спека не учитывает химический состав шихты, а также в расчётах не учитывается материальный баланс одного из управляющих параметров – расхода пыли.

Данный подход получил развитие в работе [48], в которой предложены системы управления для печей кальцинации, спекания и обжига. Для печи кальцинации была предложена математическая модель на основе уравнения однопараметрической диффузии, уравнения Аррениуса и системы обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих распределение температуры по длине печи. Такой подход позволяет учесть продольное перемешивание, которое как отмечается в работе, оказывает существенное влияние на качество глинозема. Однако автор отмечает невозможность применения разработанной модели в процессе

непрерывного управления на момент публикации работы из-за ограничений к скорости расчёта модели. Поэтому предлагается статистическая модель (1.9).

$$y_{Al_2O_3} = a_0 + a_1 T_{m.прок} + a_2 T_{m.охлаж} \quad (1.9)$$

где $T_{m.прок}$ – температура материала в зоне прокали, °С,

$y_{Al_2O_3}$ – показатель качества спека,

$T_{m.декорб}$ – температура материала в зоне охлаждения, °С.

При этом в качестве показателя качества может использовать содержание α - Al_2O_3 или величина ППП. Для обоих показателей в работе представлены методы априорной идентификации на основе разработанной модели. Также в процессе эксплуатации разработанной системы определено, что коэффициенты a_1 и a_2 не нуждаются в последующей корректировке при условии неизменности конструкции печи. Коэффициент a_0 необходимо корректировать раз в 2-3 недели, путем оперативной идентификации модели.

В работе [48] исследуется очень важный вопрос о выборе параметра оценки качества спека. На предприятиях спек может оцениваться с помощью «стандартного выщелачивания», гранулометрического состава или пористости. Однако статистической модели автор (1.9) отмечает, что применение данной модели для оперативного управления тепловым режимом оказалось неэффективным вследствие того, что не удалось разработать достаточно точный алгоритм задания регулятора качества спека. Объясняется это тем, что на извлечение полезных компонентов из спека оказывает влияние не только режим термообработки, но и колебания содержания в сырьевой шихте оксидов металлов. Более того по результатам экспериментов [53] автор отмечает, что содержание полезных компонентов, извлекаемых из спека, зависит в большей степени от химического состава шихты, чем от термообработки. Таким образом, автор формулирует следующие требования к показателю качества спека при оперативном управлении процессом спекания: инвариантность к колебаниям химического состава и избирательная чувствительность к повышению и понижению температуры в печи.

При это автор отмечает, что ни один из отмеченных выше критериев оценки качества не может выступать в качестве критерия для оперативного управления, так как не соответствуют первому пункту. Поэтому автор предлагает новый критерий для оценки качества нефелинового спека на основе пяти лингвистических градации, которые основаны на опыте визуального анализа качества спека оператором печи: «плав», «крепче нормы», «норма», «слабее нормы», «брак». Градация «брак» характеризуется мелким быстро темнеющим материалом, перемежающимся с крупными, до полуметра в диаметре, черными кусками обмазки. «Плав» - равномерно оплавленные раскаленные шары от 40 мм в диаметре. Градации «норма» отвечает раскаленный материал полифракционного состава, в котором присутствуют оплавленные шарики 10-15 мм. Градация «крепче нормы» и «слабее нормы» являются промежуточными

между «нормой» и «плавом» и «браком» соответственно [53]. Наилучшее для данного химического состава шихты качество спека, соответствующее градации «норма», достигается при оптимальном тепловом режиме печи. Отклонение средней температуры в зоне спекания от оптимальной ± 20 °С при переработке кольских нефелинов соответствует переходу качества спека из градации «норма» в градацию «слабее нормы» или «крепче нормы». Для оперативного определения градации используется новый параметр – амплитуда флуктуаций цветовой температуры материала, выходящего из зоны спекания печи, который косвенно характеризует фазовый состав алюминатного спека и может непрерывно автоматически измеряться. Градация определяется на основе математической модели (1.10):

$$V(i) = \begin{cases} 1, & \text{если } o(i) \leq F_1 \\ 2, & \text{если } F_2 \leq o(i) \leq F_3 \\ 3, & \text{если } F_4 \leq o(i) \leq F_5 \\ 4, & \text{если } F_6 \leq o(i) \leq F_7 \\ 5, & \text{если } o(i) \geq F_3 \\ Q(i-1) & \text{если } F_j \leq o(i) \leq F_{j+1} \quad j = 1,3,5,7 \end{cases} \quad (1.10)$$

где $V(i)$ – градация качества продукта в дискретный момент времени i , принимающая целочисленные значения от 1 до 5 и соответствующая лингвистическим оценкам качества («плав», «крепче нормы», «норма», «слабее нормы», «брак»),

$V(i-1)$ – значение градации качества на предыдущем шаге дискретизации, отражающее инерционность процесса формирования качества продукта,

$o(i)$ – измеряемая косвенная характеристика теплового режима печи в момент времени i , в работе [48] используется амплитуда флуктуаций цветовой температуры материала,

F – параметры модели, определяющие границы доверительных интервалов переменной $o(i)$,

j – индекс неопределенного интервала, принимающий значения 1,3,5,7, соответствующие зоны перекрытия соседних градаций качества.

Модель (1.10) описывает процесс формирования градации качества продукта во времени как результат классификации измеряемой базовой переменной $o(i)$ при ограниченной и нечёткой исходной информации. В основе модели лежит предположение о дискретном характере технологической оценки качества продукта, согласно которому каждой градации качества соответствует определённый доверительный интервал значений базовой переменной, задаваемый параметрами F . При попадании $o(i)$ в один из таких интервалов значение качества $V(i)$ определяется однозначно, что соответствует высокой степени достоверности классификации. В случае, когда значение базовой переменной оказывается в зоне перекрытия соседних градаций качества, где ни одна из функций принадлежности не превышает заданный α -уровень, модель использует инерционное правило сохранения предыдущего состояния $Q(i-1)$. Тем самым учитываются как ограниченная разрешающая способность измерительной

информации, так и инерционность процесса образования качества продукта, вследствие чего модель обеспечивает устойчивую классификацию качества при наличии шумов измерения и колебаний теплового режима и может быть использована для оперативного прогнозирования качества в системах управления процессом спекания и обжига.

Интерес представляет подход использован в работе [50]. Стабилизацию режима работы ТВП для спекания нефелино-извесняковой шихты предполагается осуществлять по отклонению измеренного значения электропроводности материала от рассчитанного. Причем значения электропроводности измеряются и рассчитываются в различных зонах печи, а между показаниями в различных зонах задано фиксированное транспортное запаздывания. Расчёт осуществляется по уравнению (1.11).

$$\vartheta_i(t) = a_0 + a_1 T_{m_i}(t) + a_2 \vartheta_{i-1}(t + \tau_1) + a_3 M_{\text{из}}(t + \tau_2) + a_4 M_{\text{цел}}(t + \tau_2) + a_5 B_i \quad (1.11)$$

где T_{m_i} – температура материала в соответствующем сечении печи °С,

ϑ_i – электропроводность материала на i -ом участке печи,

τ_i – транспортное запаздывания в соответствующем сечении печи, с.

B_i – кажущаяся энергия активации.

На каждом участке рассчитывается $\vartheta_i(t)$ сравнивается с измеряемым значением на этом же участке, после чего их разность подается на вход локального регулятора, который вырабатывает управляющий сигнал для изменения воздействия, связанного с данной зоной. Локальные регуляторы используют ПИД-закон управления. На верхнем уровне системы управления происходит определение оптимальных значений кажущейся энергии активации. Критерием оптимальности в данном расчёте выступает максимальное извлечение Al_2O_3 из спека, которое определяется по полиномиальному уравнению, которое учитывает расход пыли, химический состав и температуру. Однако следует отметить, что данный подход не учитывает изменение скорости движения материала между точками измерения электропроводности при изменении температурного профиля. Также при расчете не учитывается изменение химического состава в результате селективного пылеуноса и пылевозврата. Кроме того, используемые контуры для стабилизации электропроводности в различных точках несогласованы между собой т.е. наблюдается неавтономность системы, в результате которой управляющий параметр одного контура вносит возмущения в другой, что снижает качество регулирования. Также в самом методе анализа состояния процесса на основе измерения электропроводности присутствуют недостатки, заключающиеся в нелинейности на некоторых участках печи.

Большой интерес представляет система управления на основе предиктивной модели, разработанная в работе [36] для спекания нефелино-известняковой шихты. В её основе лежит комплексная ММ, по результатам расчёта которой осуществляется вычисление степени извлечения глинозёма. Причем следует отметить проработанную химическую модель, которая

рассчитывает движение «малой порции» материала, при этом в работе учитывается изменение скорости движения материала от температуры на различных участках печи. За счёт временного шага и известной скорости движения на данном участке время связывается с координатой вдоль печи. Более того модель учитывает селективность пылеуноса и пылеосаждения через статистическую подмодель уноса и возврата пыли. Также для описания химических реакций используются шесть коэффициентов, в совокупности описывающих скорость протекающих реакций и диффузию продуктов, зависящих от температуры и вычисляемых в процессе идентификации модели. В системе рассматриваются два критерия оптимальности: максимальное извлечение глинозема и максимальная производительность. В работе предложены два контура управления: стабилизация температуры газа в зоне сушки путём изменения геометрических размеров топливного факела и стабилизация температуры материала на выходе из печи изменением технологической пыли. Следует отметить, что при снятии статических и динамических характеристик контроль геометрических размеров топливного факела осуществлялся косвенно — по положению штурвала штока завихрителя топливной форсунки [36], при этом размер факела задавался в процентах от его максимальной длины. Таким образом, непосредственное измерение реальной геометрической длины факела не производилось. Вследствие этого фактическая длина факела могла существенно изменяться под воздействием других эксплуатационных факторов, в том числе расхода пыли, возвращаемой в печь. Математические зависимости, используемые для расчёта температуры материала в различных зонах печи, основаны на теоретических предположениях и анализе статистических данных. В результате изменения параметров объекта управления, например толщины обмазки футеровки, указанные зависимости могут давать значительную погрешность, поскольку коэффициенты, входящие в уравнения модели, не корректируются в процессе её идентификации.

Также следует отметить, что работы [36; 49] и другие связанные с расчётом степени извлечения глинозема и щелочей как выходного параметра не учитывают вторичные потери при извлечении из-за фазового состава спека, который определяется процессом охлаждения. Работа посвящена изучению данного процесса и показывает, что увеличение $\alpha' - C_2S$ приводит к потерям Al_2O_3 и R_2O .

В работе [46] система управления представлена в виде нескольких блоков или уровней. Над технологическим объектом функционирует уровень локальных автоматических подсистем управления, обеспечивающих стабилизацию параметров процесса. В рамках данного уровня реализуются автономная система поддержания концентрации CO_2 , каскадная система поддержания температуры материала в зоне спекания, а также система оптимизации содержания свободной окиси кальция в клинкере. Работа этих подсистем опирается на идентифицированные динамические модели участков печи. В блоке идентификации на основе статистической

обработки температурных и газоаналитических сигналов формируются передаточные функции отдельных зон и межзонных связей, которые далее используются как в локальных системах регулирования, так и в задачах прогнозирования и оптимизации. Над уровнем локального автоматического регулирования располагается блок прогнозирования, предназначенный для оценки возможного развития технологического процесса при различных вариантах управления. Используя текущие измерения и идентифицированные модели, данный блок формирует прогнозные значения температурных и химических показателей, что позволяет заранее выявлять тенденции, ведущие к ухудшению режима обжига или снижению качества клинкера. Результаты прогнозирования передаются оператору и в систему выбора управления. Выбор управляющих воздействий в итоговой системе осуществляется в диалоге с оператором. Вектор управляемых переменных включены: температура материала в зоне подогрева и кальцинирования, температура и давление отходящих газов, нагрузка на привод печи, концентрация CO_2 в отходящих газах и температура и давление вторичного воздуха. Вектор управляющих воздействий включает в себя расход топлива, положение шиберов дымососа, расход шихты и скорость вращения печи. Прежде всего, основным ограничением системы является её сильная зависимость от допущения стационарности. В реальных условиях эксплуатации вращающейся печи режимы обжига часто носят квазистационарный или переходный характер, обусловленный изменением состава сырья, колебаниями влажности, нестабильностью качества топлива и внешними возмущениями. В таких условиях корректность идентифицированных статистических моделей может существенно снижаться, что приводит к ухудшению качества прогнозирования и оптимизации. Существенным недостатком является также отсутствие явного физико-химического описания процессов теплообмена и клинкерообразования. Используемый в работе подход основан на эмпирической идентификации динамических связей между зонами печи и не учитывает напрямую теплопроводность, теплоёмкость, фазовые превращения и кинетику химических реакций. Это ограничивает применимость модели за пределами диапазона режимов, в которых проводилась идентификация. Отдельной проблемой является использование фиксированных постоянных времени зон, оцениваемых по времени пребывания материала. Такое допущение не отражает реальной изменчивости инерционности процесса, которая зависит от скорости вращения печи, степени заполнения, состояния цепных завес и теплообменных поверхностей, наличия обмазки и протекания химико-физических превращений шихты.

В [25] разработан подход к управлению процессом обжига клинкера во вращающейся цементной печи, основанный на построении интеллектуальной советующей системы управления с использованием нечетких диаграмм поведения. В качестве основы моделирования автор использует представление технологического процесса в виде совокупности взаимодействующих узлов, соответствующих отдельным технологическим переменным печи. Для каждого узла

строится нечеткая диаграмма поведения, отражающая возможные состояния параметра и условия переходов между ними. Учет взаимного влияния узлов позволяет сформировать целостную нечеткую модель процесса обжига, на базе которой реализуется советующая система управления. Данная система анализирует текущие измеренные параметры, выявляет отклонения от нормального режима и формирует рекомендации оператору по изменению управляющих воздействий, при этом окончательное решение остается за человеком. К достоинствам предложенного подхода относится возможность формализации экспертных знаний и учета нечетких, трудно описываемых зависимостей, характерных для процесса обжига клинкера. Однако разработанная система обладает и рядом существенных недостатков. В первую очередь, нечеткие диаграммы поведения не содержат явного описания динамики тепломассообмена и химических реакций, что ограничивает применимость системы при анализе переходных режимов и оптимизации энергопотребления. Формирование продукционных правил в значительной степени опирается на экспертные оценки, что снижает воспроизводимость результатов и затрудняет перенос системы на другие печи или условия эксплуатации. Кроме того, советующий характер системы не обеспечивает автоматического достижения оптимальных режимов и не исключает влияния субъективных решений оператора. Отсутствие механизмов адаптации параметров нечетких моделей в реальном времени также ограничивает эффективность системы при изменении свойств сырья, топлива и режимов работы печи.

В [19] предложено комплексное алгоритмическое решение задачи управления и интенсификации процесса обжига клинкера в промышленных вращающихся печах, основанное на формировании и поддержании оптимального теплового состояния зоны спекания по совокупности косвенных технологических параметров. В отличие от традиционных подходов, ориентированных на стабилизацию отдельных температурных показателей, предложенное решение реализует многоблочную структуру управления, включающую алгоритмы стабилизации качества сжигания топлива, формирования устойчивой клинкерной обмазки, управления грануляцией клинкера и оптимизации энтальпии зоны спекания, что обеспечивает повышение стойкости футеровки, снижение пылеобразования, уменьшение удельного расхода топлива и рост стабильности качества клинкера в условиях промышленной эксплуатации.

В работе [146] с помощью MPC системы управления ставилась задача оптимизации целевых переменных процесса при минимизации расхода топлива и электроэнергии. Реализация модели проводилась по следующему алгоритму: для каждой пары «управляющий параметр – целевой параметр» была построена модель на основе исторических данных с помощью подхода FOPDT (First Order Plus Dead Time), реализована MIMO (Multiple Input, Multiple Output) модель. На основе построенных моделей была реализована дискретная модель в пространстве состояний. Задача оценки состояния решалась с помощью фильтра Калмана. Модели на основе данных

обучались с использованием алгоритма Левенберга-Марквардта. Оптимизация параметров происходит по двухуровневой архитектуре: LP (Linear Programming) и QP (Quadratic Programming).

В исследовании [147] применяется двухслойная архитектура управления. В данном подходе используются два слоя: TOCS (Targets Optimization and Constraints Softening) – оптимизация установленных целей и смягчение ограничений и DO (Dynamic Optimizer) – вычисляет оптимальные управляющие воздействия, используя концепцию скользящего горизонта. В качестве модели же выступает модель, полученная на основе идентификации производственного объекта по методологии FOPDT и SOPDT (Second Order Plus Dead Time), которая подробно изложена в работе [110].

В работе [151] предложен новый гибридный подход, сочетающий предложенную Saeman математическую модель для расчета осевых параметров движения материала [105; 130], которая позволяет рассчитать время прохождения материала через печь, и RNN (Recurrent Neural Network) с механизмом внимания и решателем ODE-LSTM (Ordinary Differential Equation - Long Short-Term Memory). Комбинированный подход также рассматривается в работе [73], однако в ней используются уравнения движения газов RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes), LES (Large Eddy Simulation), DES (Detached Eddy Simulation), а обучение нейронных сетей производится по результатам численного моделирования в Ansys.

В статье [85] представлена модель производства извести с использованием ANN (Artificial Neural Network). Модель используется для оптимизации процесса. Для обучения была использована нейронная сеть ANN с архитектурой MLP (Multilayer Perceptron). Сеть обучалась по алгоритму Байесовская регуляризация. Для настройки весов нейронной сети был использован метод обратного распространения ошибки.

В исследовании [152] реализуется система управления на основе температуры в зоне кальцинации. В основе системы лежит модель на основе данных, обученная по методу SVM. Для оптимизации управляющих воздействий используется метод PSO (Particle Swarm Optimization).

В статье [139] предлагается комбинированный подход к управлению системой обжига клинкера с использованием двух моделей: ELM (Extreme Learning Machine) для нелинейного стационарного моделирования и ARX (AutoRegressive with eXogenous inputs) для динамического управления. Модель ELM используется для описания стационарных нелинейных зависимостей, а ARX – для моделирования динамики системы. Предлагаемая модель ELM-ARX позволяет корректировать параметры модели в режиме реального времени, что делает управление системой более точным и эффективным. Реальные испытания на производстве показали, что использование модели ELM-ARX снижает колебания концентраций NO_x и O₂ и улучшает общую стабильность системы.

В статье [111] предложен комбинированный подход к управлению температурой в зоне горения цементной печи с использованием традиционного PID-контроллера, в сочетании с ANN моделью. Разработана гибридная система, которая может автоматически переключаться между различными стратегиями управления в зависимости от текущих рабочих условий и изменений в процессе.

1.2.4 Выводы по разделу

В заключении данного подраздела можно отметить, что наиболее актуальными направлениями развития систем управления является разработка систем усовершенствованного управления, преимущественно на базе предиктивных моделей, и разработка мягких датчиков.

Среди рассмотренных систем усовершенствованного управления на базе прогнозных моделей подавляющее большинство использует для определения выходных параметров процесса (качество спека, температурный профиль материала, электропроводность материала и др.) экспериментально полученные полиномиальные зависимости. Учитывая многосвязность, параметрическую неопределенность и возможность изменение параметров объекта в процессе эксплуатации, например образование колец и обмазки, применение данных зависимостей имеет множество ограничений. Аналогичная ситуация и с нейросетевыми моделями, обученными на исторических данных. Однако и разработка полноценного цифрового двойника объекта, учитывающего его динамические характеристики, и прогнозирующего изменение поведения объекта в реальном времени является весьма обширной задачей, требующей более глубокого изучения процессов, протекающих в ТВП, а также улучшения аппаратной части существующего оборудования для расчетов подобных моделей. Перспективным решением является разработка статической предиктивной модели в сочетании с экспертной базой правил нечеткой логики.

При разработке системы управления необходимо учесть ряд важных особенностей объекта. В частности, ТВП относится к объектам с распределенными параметрами, следовательно, при внесении управляющего воздействия для стабилизации параметров на одном участке печи, эти же изменения могут стать возмущающими для параметров на другом участке. Наибольшее возмущающее воздействие в другие зоны вносит расход топлива, поэтому он должен быть задействован только при наиболее значительных отклонениях. Кроме того, разрабатываемая комплексная математическая модель должна учитывать изменение скорости движения материала по мере его движения в ТВП, как в результате физико-химических превращений, так и в результате изменения ФРП при образовании обмазки и колец. Для подробного рассмотрения данного момента следующие разделы главы посвящен математическому моделированию движения материала в ТВП: поперечному и осевому.

Ещё одним важным моментом является то, что на сегодняшний день параметр толщины обмазки относится к неконтролируемым возмущающим воздействиям так как существующие

системы управления, применяемые на предприятиях, чаще всего не оборудованы системами, позволяющими определить её толщину, хотя подобные решения достаточно широко описаны в литературе. Поэтому в будущем при разработке модели толщина обмазки будет считаться известным параметром, данные о котором поступают из внешнего блока системы управления.

1.3 Поперечное движение материала в ТВП

1.3.1 Режимы движения материала

Поперечное движение описывает движение материала в поперечном срезе. В зависимости от параметров движения в литературе было определено 7 основных режимов движения. Четкое определение режимов приводится в работе [99] и позже расширяется в работе [113]. Режим характеризуется значениями трех параметров: число Фруда, степень заполнения, коэффициент трения. Таблица с численными значениями характерными для каждого режима, а также промежуточных состояний представлены в работе [113]. Краткая характеристика всех режимов движения, составленная на основе работы [113] представлено в таблице 1.6.

При этом в дальнейшем речь будет идти про режим движения вращения (rolling), так как именно он является наиболее желательным для трубчатых вращающихся печей. Следует сделать небольшое отступление по вопросу терминологии. В современных англоязычных публикациях используется устоявшаяся терминология, представленная в таблице 1.6. В русскоязычных источниках могут встречаться различные наименования: пересыпающееся движение, режим качения, режим прокатки и т.д. Далее во всем тексте данной работы если используются подобные выражения следует помнить, что речь идет именно о режиме движения rolling.

Таблица 1.6 – Режимы движения материала (составлено автором)

Slipping motion	
Режимы данной группы характеризуются главным образом отсутствием перемешивания материала и вызваны крайне низкой шероховатостью стенок цилиндра.	
Sliding	Возникает в цилиндрах с гладкими стенками. Характеризуется тем, что масса материала покоится под определенным углом и просто соскальзывает по вращающейся стенке цилиндра. Перемешивание материала практически отсутствует.
Surging	В сравнении со Sliding масса материала также не перемешивается, однако из-за менее гладкой стенки масса материала прилипает к стенке и некоторое время движется вместе со стенкой, однако после прохождения некоторого расстояния материал снова соскальзывает в исходное положение.

Продолжение Таблицы 1.6

Cascading motion	
Режимы данной группы характеризуются главным образом хорошим перемешиванием материала и возникают при достаточно высоком трении стенки цилиндра. Какой именно из режимов данной группы будет протекать зависит от следующих факторов: степень заполнения, скорость вращения, размер частиц.	
Slumping	В отличии от Surging материал не соскальзывает после некоторого пройденного расстояния на стенке цилиндра, а лавинообразно скатывается, что порождает своего рода дискретный процесс, в котором чередуется: движение всей массы материала вместе со стенкой и его скатывание вниз.
Rolling	Именно данный тип движения считается наиболее желательным во вращающихся печах, так как он обеспечивает наиболее благоприятные условия для передачи тепла и протекания химических реакций. Описать его можно следующим образом: в поперечном сечении материал разделяется на две области: застойную и активную. В застойной области перемешивание практически отсутствует, в активной же наоборот происходит активное перемешивание. При этом обычно поверхность слоя остаётся ровной.
Cascading motion	
Cascading	В данном режиме слой «сворачивается», высота слоя также увеличивается, а также перестает быть ровной.
Cataracting motion	
Режимы данной группы характеризуются главным образом выбросом отрывом отдельных частиц от общей массы материала и выбросом их в пространство печи. Данные режимы достигаются за счёт высокой скорости вращения барабана.	
Cataracting	Данный режим характеризуется выбросом частиц в пространство печи, который возрастает с увеличением скорости вращения.
Centrifuging	Достигается при ещё большем увеличении скорости вращения и характеризуется прилипаем выброшенных из общей массы частиц к поверхности барабана.

1.3.2 Пересыпающийся режим движения (rolling)

Следует отметить понятия характерные для данного режима, для этого рассмотрим рисунок 1.10.

В режиме качения можно выделить две зоны: активный слой и пассивная зона, между которыми расположена граничная линия. В пассивной зоне частицы движутся вместе с вращением стенки, при этом перемешивание внутри данной области практически не происходит. Когда частицы доходят до верхней поверхности, они начинают скатываться вниз – это движение и представляет активный слой. Именно внутри этого слоя и происходит основной перемешивание. Причем на рассмотренное ранее осевое движение влияет движение частиц в активном слое. Граничная линия – это ещё одна зона, которая характеризуется низкой поперечной скоростью, стремящейся к нулю.

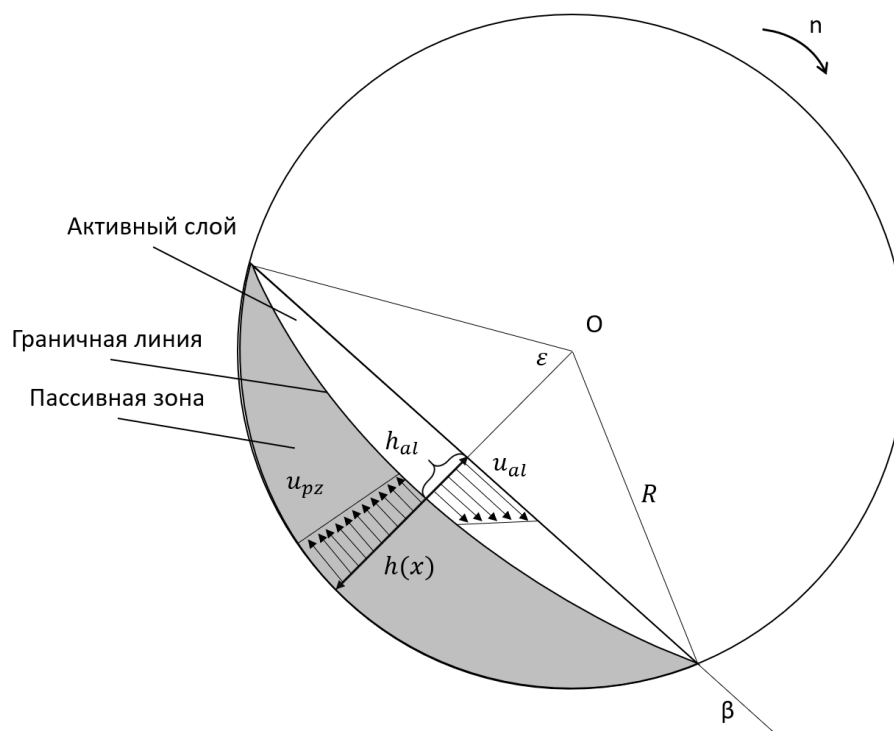


Рисунок 1.10 – Схема поперечного движения материала в ТВП (составлено автором), где ε – центральный угол, град., R – внутренний радиус печи, м, β – динамический угол естественного откоса, град., x – осевая координата по длине печи, м, u_{al} – поперечная скорость движения материала в активном слое, м/с, u_{pz} – поперечная скорость движения материала в пассивной зоне, м/с, h – высота слоя материала, м, h_{al} – толщина активного слоя, м.

Материал, как показано на рисунке 1.10, находится под некоторым углом, который характеризуется свойствами материала (коэффициент трения частиц, распределение размеров, насыпная плотность [138]) и называется динамическим углом откоса. Из чего следует, что при моделировании процессов, протекающих в трубчатой вращающейся печи этот параметр, может меняться по длине агрегата, ввиду протекания различных физико-химических процессов, которые приводят к изменению свойств шихтового материала [65]. Например, в ходе спекания будет меняться размер и свойства частиц. Однако при рассмотрении одной конкретной поперечной плоскости угол будет постоянным.

Статический угол откоса сыпучего материала – это максимальный угол наклона поверхности материала, при котором частицы остаются в состоянии покоя относительно друг друга и не скатываются вниз под действием силы тяжести. Статический угол откоса также является параметром, характеризующим свойства материала, и также может изменяться в результате химико-физических превращений.

Степень заполнения Z представляет собой долю площади поперечного сечения цилиндра, которая занята материалом и определяется с помощью угла сектора заполнения по следующей формуле (1.12) [113].

$$Z = \frac{1}{\pi} \left(\frac{\varepsilon}{2} - \sin \left(\frac{\varepsilon}{2} \right) \cos \left(\frac{\varepsilon}{2} \right) \right) \quad (1.12)$$

1.4 Осевое движение материала в ТВП

1.4.1 Основные понятия

Под осевым движением понимается движение вдоль печи, т.е. процесс движения частиц от места загрузки к месту выгрузки (рисунок 1.11). Такое движение характеризуется следующими параметрами: MRT (mean resident time), RTD (resident time distribution), осевая скорость движения материала, высоты слоя материала и степень заполнения. Причем следует отметить, что высота слоя материала и соответственно степень заполнения не являются постоянными по всей длине печи и изображаются в виде профиля по длине агрегата [80].

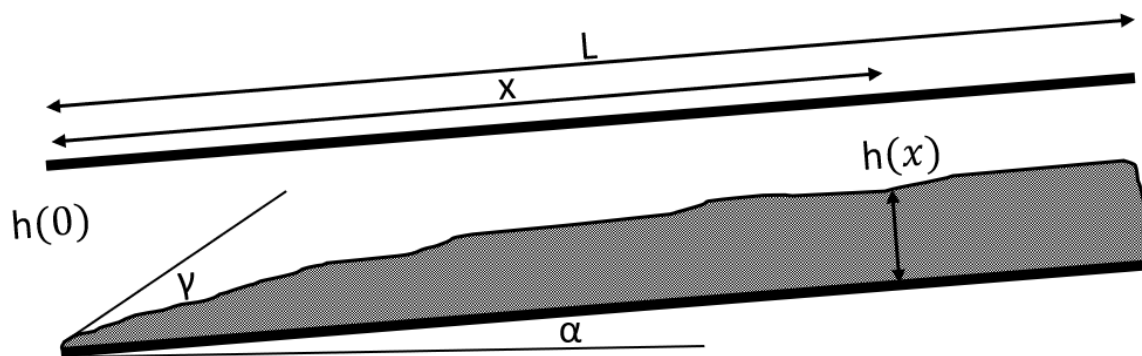


Рисунок 1.11 – Осевое движение материала (составлено автором)

Важно сразу сделать небольшое отступление. Существует два типа работ рассматривающих время пребывания сыпучих материалов во вращающихся цилиндрах. Работы, которые будут рассмотрены в данной исследовании анализируют MRT (Среднее время пребывания) – это единственное значение, усредняющее время прохождения материала. При этом в литературе часто рассматривается также RTD (Распределение времени пребывания) – распределение времени, в течение которого отдельные частицы проходят через печь. Оно учитывает вариации во времени пребывания различных порций материала. MRT может использоваться для определения среднего времени прохождения материала через печь, чтобы оценить общую производительность. RTD показывает, как частицы перемещаются – есть ли застойные зоны, быстрая транспортировка, перемешивание, а также неоднородности. В данной работе параметр RTD не рассматривается.

Как отмечено в работе [21] все работы по исследованию параметров осевого движения материала во вращающихся печах можно условно разделить на две крупные группы. В первой проводятся экспериментальные исследования в небольших лабораторных вращающихся цилиндрах при комнатной температуре с постоянными свойствами материала. В ходе экспериментов с различными материалами в широком диапазоне варьируются значения рабочих параметров (скорость вращения, угол наклона печи, скорость подачи материала, степень

заполнения), а также используются барабаны различной геометрии с включением дополнительных устройств во внутреннем пространстве. При выборе значений параметров в экспериментах, относящихся к трубчатым вращающимся печам главным критерием соответствия реальному режиму движения, является поддержания режима движения rolling. Во второй же группе исследования проводились на реальных печных агрегатах непосредственно в процессе их работы. Такой подход позволяет оценивать влияния множества аспектов, которые не моделировались при лабораторных исследованиях: цепная завеса, обмазка, изменение свойств материала по мере движения материала. Однако такие работы значительно ограничены в вопросах варьирования рабочих параметров в ходе эксперимента, ввиду сложности и высокой цены проведения опытов на реальном объекте. Поэтому для комплексного понимания процессов осевого переноса материала во вращающихся печах необходимо тщательное рассмотрение опытов и математических моделей, полученных в результате обеих групп исследований. В Приложении А в таблицах А.1-А.3 представлена информация об экспериментах, проведенных в научной литературе по каждому из рассматриваемых параметров осевого движения [88].

1.4.2 Эксперименты по определению высоты слоя материала

Лабораторные исследования без внутренних устройств

Одно из первых экспериментальных исследований, которое можно найти в научной литературе по теме определения высоты слоя материала в трубчатых вращающихся печах датировано 1927 годом [137]. Данные, полученные в рамках этого исследования в последующем, активно использовались в литературе при разработке и верификации математических моделей. В табличной форме данные из эксперимента [137] можно найти в работе [122]. Отталкиваясь от данного исследования, в первую очередь следует рассмотреть барабаны без каких-либо геометрических особенностей. Результаты масштабных опытов с множеством материалов представлены в книге [64]. В опытах проводилось варьирование угла наклона цилиндра, скорости вращения, размеров частиц и диаметра исследуемого цилиндра. Использование 6 различных материалов в одном исследовании позволило охватить большой диапазон свойств материалов. Схожее исследование с использованием песка, как и в эксперименте [137], проводилось в [136]. Однако в данном исследовании рассматривалось влияние трех рабочих параметров (скорости вращения, угла заполнения и степени заполнения). А также, в отличие от большинства исследований представленных в Таблице А.1 рассматриваются и переходные режимы работы при резком изменении скорости подачи материала, скорости вращения печи и её угла наклона. Кратко анализируя результаты, полученные авторами, можно отметить следующее. При увеличении угла наклона цилиндра высота слоя уменьшалась на входе и увеличивалась на выходе. При увеличении скорости вращения высота слоя материала снижалась по всей длине

цилиндра. При увеличении подачи материала, сначала материал накапливался, затем весь профиль становился глубже. При уменьшении этих параметров во всех случаях наблюдался противоположный эффект на глубину слоя. Результаты согласуются с работами [82; 86; 135]. В работе [105], в которой в качестве исследуемых материалов использовался уголь и кокс отмечается, что при наличии обратного потока профиль высоты слоя не зависит от скорости вращения цилиндра. Работа [81] посвящена влиянию геометрических размеров цилиндра на осевое движение. Применительно к высоте слоя материала было отмечено, что процентное заполнение печи быстро снижается при увеличении диаметра до 55%, но последующее увеличение диаметра оказывает незначительное влияние на высоту слоя. Увеличение же длины печи не приводит к каким-либо значительным изменениям в высоте слоя материала. Лабораторное исследование на печи, габариты которой сопоставимы с реальными размерами приведено в исследовании [116]. Данные исследований были расширены по количеству материалов в работе [135], в которой использованы кварцевый песок, клинкер и стеклянные шарики. В работе [82] также есть исследования без внутренних конструкций, в них рассматривалось движение железной руды. Все рассмотренные опыты проводились с частицами, которые возможно описывать с допущением об их шарообразности, поэтому следует дополнить исследования данными из частиц не шарообразной формы. Такие данные представлены в работе [86], в которой исследовалась древесная щепа.

Лабораторные исследования с внутренними устройствами

Теперь стоит обратиться к работам, которые исследовали влияние геометрии барабана на профиль высоты слоя материала. Первыми рассмотрим исследования, в которых использовались заглушки. В работе [82] рассматривались заглушки на выходе печи, покрывающие от 0 до 50% внутреннего диаметра цилиндра. В результатах работы авторы отмечают, что в сочетании с варьированием рабочих параметров (скорость вращения и угол наклона) изменение диаметра выходного конца за счет установки заглушки позволяет поддерживать практически ровный профиль глубины слоя по всей длине печи. Также в работе отмечается, что с повышением высоты заглушки наблюдалось повышение уровня материала, профиль становится более ровным с небольшим превышением в центральной части печи. Работа [82] расширяется большим количеством экспериментальных данных при использовании заглушек тех же размеров в цилиндрах с разной длиной и диаметром в работе [81]. Полученные результаты согласуются с работой [132], в которой предлагается формула (1.13) для расчета размера заглушки, позволяющего получить равномерный профиль материала по длине печи.

$$h_0 = R \left(1 - \cos \left(\frac{\varepsilon}{2} \right) \right) \quad (1.13)$$

В работе [116] рассматривается применение заслонки в печах сопоставимых по размеру с промышленными агрегатами. Работа подтверждает ранее сделанные выводы. Размещение заслонки не только в конце агрегата, но и внутри него рассматривалось в работе [134]. Дамбы внутри были трех типов: тонкие, толстые и конические. Они размещались в середине цилиндра. Оценка их воздействия показала, что при низких скоростях вращения и тонких дамбах наблюдалось резкое снижение высоты слоя после дамбы, по сути, в таком случае цилиндр разделялся на две зоны с разной загрузкой. Увеличение скорости позволяет устранить данный «перепад» и сделать профиль более равномерным. Также при использовании толстых дамб эффект перепада был значительно ниже при любых значениях скорости. Наиболее сглаженное влияние показали конические дамбы. Авторы рассматривают данную конструкцию как один из способов оптимизировать профиль высоты материала внутри промышленного агрегата. Влияние конической заслонки на выходе из печи на высоту материала в объекте рассматривается в работе [135].

Отдельно следует выделить работу [80]. Эта публикация завершает комплексное исследование из трех частей [82] и [81] и рассматривает вопрос влияния обмазки на осевые параметры движения. Для имитации обмазки использовались конические заслонки, заканчивающиеся на 66% длины печи от загрузочного конца. Различные размеры и углы конических заслонок тестировались в двух печах разной длины (2000 мм и 4800 мм) и одинакового диаметра (300 мм). Использовались конические заслонки в своей самой узкой части закрывающие: 15, 30, 45, 60, 75% от внутреннего диаметра исследуемых цилиндров. При имитации обмазки покрывающих более 15% внутреннего диаметра наблюдается ощутимое влияние на профиль высоты материала. Он не только повышается, но и меняет свою форму, приводя к накоплению материала в отдельных частях печи.

Промышленные эксперименты

Среди работ по трубчатым вращающимся печам можно выделить несколько, в которых представлен профиль высоты материала по длине реальной цементной печи в производственных условиях. К одной из таких работ относится статья [103], в которой опубликованы результаты опытов на Себряковском заводе, проводимые с помощью метода меченных атомов. В статье не указаны значения рабочих параметров процесса во время проведения опытов, а также отсутствует описание гранулометрического и химического состава использованного в работе шихтового материала. Среди современных работ, исследующих движение материала в промышленных трубчатых вращающихся печах, в которых представлено большее количество информации о процессе можно выделить [117]. Однако в работе также отсутствуют многие важные практические аспекты, например, наличие и структура цепной завесы, состав шихтового материала и многое другое. Наиболее подробное описание режима работы исследуемого агрегата

дано в работе [64], в которой проводились опыты на Ленинградском цементном заводе. Дополнительно кроме высоты слоя и скорости движения материала, автор определял изменение статического угла откоса, динамического угла откоса и насыпной плотности по мере движения материала внутри печи. Все эти данные также представлены в работе [64] и являются уникальным источником информации даже в контекст современных исследований.

Одним из основных источников информации послужила книга [29], в которой достаточно подробно описаны эксперименты проводимые на нефелиновых печах ПГЗ и ВАЗ с указанием информации о режимных параметрах и конструкции печи, а также наличии цепных завес и их конструкции. Однако в работе не сообщается информации о наличии или отсутствии обмазки при проведении экспериментов.

Согласно работе [129], если к печи, находящейся в установившемся режиме, применить увеличение расхода топлива при неизменных остальных условиях приводит к периоду повышения толщины слоя в зоне. Это объясняется смещением температурных зон печи вверх, что приведет к увеличению температуры выходных газов и тому, что гранулы после зоны цепной завесы станут более сухими и мелкими. Это приводит к тому, что материал будет двигаться быстрее между зоной цепной завесы и зоной горения. Аналогичный эффект будет наблюдаться при увеличении тяги и избытка воздуха без изменения других параметров. Схожий эффект будет также наблюдаться если шихта, подаваемая в печь, станет менее влажной. Однако если измененные параметры будут поддерживаться на одном уровне в течении нескольких часов, то высота материала в зоне горения постепенно вернется к норме.

Снижение же скорости вращения печи приводит к уменьшению количества выгружаемого клинкера, что в свою очередь влияет на температуру вторичного воздуха. Зоны печи опять же будут смещаться вверх по печи, что снова приведет к повышению температуры выходных газов и как следствие к периоду высокой загрузки зоны горения. Однако в отличии от ранее рассмотренных ситуаций затем будет период низкой загрузки зоны горения в результате увеличения скорости вращения.

Профили высоты материала приведенные в работе [103], показывают наличие «плотины» из материала на отдельных участках – локального значительного повышения уровня. В одном из опытов она образовалась на выходе из цепной завесы, в другом в районе после цепей. Авторы предполагают, что решающим в образовании «плотины» является процесс загустевания шлама, а не сами цепи.

1.4.3 Эксперименты по определению скорости осевого движения материала

Как и в случае измерения высоты слоя материала первая работа, в которой представлены экспериментальные данные, была работа Sullivan [137]. Данные этого эксперимента также в

табличной форме представлены в работе [122]. Продолжение опытов в международной литературе происходит в работе [138], в которой в горизонтальном цилиндре измерялась осевая скорость движения двух материалов: песка и ржи. В литературе это первый источник, который сообщает об использовании частиц по форме близких к цилиндрическим. Затем перечень используемых материалов значительно расширяется в работе [64], в которой замерялись скорости клинкера, красного кирпича, известняка, мергель, сиштоф и песка при широком диапазоне варьирования рабочих параметров. Также осевая скорость измерялась в работе [105]. На основе информации из рассмотренных источников можно описать влияние рабочих параметров на осевую скорость. Так, повышение скорости вращения приводит к повышению осевой скорости, увеличение угла наклона, также провоцирует повышение осевой скорости. При этом увеличение количества материала в печи по какой-либо причине приводит к снижению скорости движения. Авторы [105] отмечают, что это снижение объясняется тем, что увеличение толщины слоя вызывает перераспределение частиц между активным слоем и пассивной областью, что сходится с [65], в которой сообщается, что основной вклад в осевое перемещение создают частицы активного слоя. Все ранее рассмотренные опыты проводились в стационарном режиме, работа [136] позволяет оценить изменения в переходных процессах при изменении скорости подачи материала, скорости вращения цилиндра и его угла наклона. Анализ скорости в печи реального размера, но без температурного процесса представлен в работе [116].

Лабораторные исследования с внутренними устройствами

Рассматривая влияние внутренних конструкций на осевую скорость движения следует обратиться к работе [115]. В ней исследовалось влияние продольных и кольцевых ребер. При использовании всех типов конструкции наблюдалось снижение осевой скорости, однако авторы отмечают различный механизм влияния ребер разного типа. Так, кольцевые ребра замедляют осевую скорость за счет создания барьеров, которые уменьшают угол наклона слоя и увеличивают глубину материала перед рёбрами. Продольные же ребра препятствуют поперечному перемешиванию частиц, увеличивая сегрегацию материала, что как следствие снижает и осевую скорость. Наибольшее влияние на осевую скорость оказал совокупный эффект применения продольных и кольцевых ребер. Также в исследовании использовались заслонки на выходе, составлявшие 10% и 16.7% от внутреннего диаметра цилиндра. Наблюдалось снижение осевой скорости движения из-за необходимости преодолевать препятствие на выходе цилиндра. В работе [83] отмечается, что заслонки при низких скоростях вращения (менее 2 об/мин) вызывали снижение осевой скорости, а при высоких (более 2 об/мин) наоборот вызывали ускорение осевой скорости движения.

Промышленные эксперименты

В первых работах на реальных промышленных объектах [129] рассматривали осевую скорость движения внутри агрегатов методом меченых атомов. В ней были отмечены очень важные выводы для исследования скорости движения во вращающихся печах: материалы подаваемые в печь одновременно, имеют различную скорость движения в печи, скорость материалов постепенно увеличивается, когда они перемещаются от зоны цепной завесы по длине печи, достигая максимум в зоне кальцинации, после чего скорость уменьшается и достигает минимума в зоне сжигания, скорость материалов значительно варьируется от одной печи к другой, при этом эти вариация не зависят от скорости вращения и диаметра печи. Автор делает предположение, что эта вариация объясняется различиями в грануляции материала. Чем мельче образующиеся гранулы, тем выше скорость. Автор полагает, что повышение скорости в зоне кальцинации вызвано не только изменением в свойствах материала, но и углекислым газом, который выделяется в этой зоне и вызывает эффект воздушного потока. Влияние рабочих параметров на осевую скорость движения также обсуждалось в работе [129]. Так, изменения параметров, приводящих к повышению температуры отходящих газов, например, увеличение расхода топлива, провоцирует увеличение скорости движения материала в зонах, предшествующих зоне горения. Касательно свойств материала в работе отмечено, что снижение влажности исходной шихты приводит к увеличению скорости движения материала в агрегате. В заключении автор делает вывод, что равномерная грануляция на выходе из зоны цепной завесы имеет первостепенное значение для стабильной работы печи.

Однако авторы работы [103] отмечают, что наблюдавшееся в работе [129] повышение скорости в зоне кальцинирования не наблюдалось. Авторы предполагают, что это может зависеть от состава шихтовой смеси.

В работе [21] проводилось исследование на трех печах Топкинского цементного завода, в результате были получены весьма подробные данные об осевой скорости движения материала в различных зонах печи и её корреляции с рабочими параметрами. Так, представленные данные в целом согласуются с выводом работы [129], например, о том, что скорость, начиная с холодного конца печи растет и достигает максимум в зоне декарбонизации, а затем минимума в зоне спекания. Однако это справедливо при рассмотрении средних скоростей внутри зоны для ряда случаев, по факту в различных опытах положение максимальной скорости наблюдалось на разных участках. Возможно, подобная непостоянность профиля скорости вызвана значительными колебаниями технологических параметров во время обжига. Так, колебания температуры отходящих газов происходили в переделах от 199 до 311 градусов Цельсия. Также в работе [21] была получена матрица корреляций скорости в различных зонах печи и технологическими параметрами. В исследовании были рассмотрены следующие

технологические параметры: температура отходящих газов, частота вращения печи, разрежение за печью, температура зоны кальцинирования, производительности печи, температура клинкера на выходе из печи, температура вторичного воздуха, площадь поверхности цепей.

В работе [64] подробно представлен профиль экспериментальной скорости движения материала, однако на графике не отмечены зоны характерные для данного участка, поэтому прямое сравнение результатов работы [21] и [64] весьма затруднительно, хотя из графика видно (Рисунок 18. [64]), что скорость также меняется нелинейно по длине печи и общий вид графика напоминает график из работы [21] (Рисунок 5.3.(в) [21]).

В работе [31] наибольшая скорость наблюдалась в зоне кальцинации, что согласуется с результатами [129]. При этом скорость была настолько высокой, что было принято решение смонтировать специальные пороги, чтобы замедлить продвижение материала. Установка порогов действительно снизила скорость в зоне кальцинации и повысил в предшествующих зонах. Также в работе [31] применяется уникальный подход к оценке влияния химико-физических превращений на осевую скорость движения материала. Так, в работе получена зависимость изменения энтальпии шихты по длине печи. Также в данном исследовании рассмотрены несколько печей: мокрая, сухая и полусухая печи.

1.4.4 Эксперименты по определению времени пребывания материала

Лабораторные исследования без внутренних устройств

Как и в случае с осевой скоростью и высотой материала первым источником лабораторных данных является работа Sullivan [137], данные из которой также представлена и в работе [122]. Далее опыты по определению MRT в горизонтальном цилиндре для цилиндрических и сферических частиц проводились в работе [138]. Опыты с горизонтальным цилиндром получили развитие в работе [70]. Затем в книге Ходорова Е. И. [64] были представлены результаты экспериментов с большим количеством различных материалов: песок, клинкер, красный кирпич, известняк, сиштоф, мергель, песок. Согласно работе [70] MRT уменьшалось при увеличении скорости подачи материала в печь, увеличивалось с ростом коэффициента заполнения барабана, уменьшалось при уменьшении скорости вращения барабана, увеличивалось при увеличении угла наклона цилиндра, что согласуется с результатами других работ [105; 132]. Также в работе [83] отмечается, что уменьшение MRT при увеличении скорости вращения выше 4 об/мин является менее значительным, а при увеличении угла откоса уменьшение MRT происходит почти линейно. MRT в габаритах промышленной печи исследовалось в работе [116]. Движение частиц не шарообразной формы рассматривается в работе [86], в которой в качестве материала была использована сырая щепа. В более современных работах уточнялись зависимость MRT от рабочих параметрах в более узких диапазонах. Так, в

исследовании [150] рассматривались малые углы наклона цилиндра (от 0.5 до 1 градуса). В ранее рассмотренных работах данный аспект не затрагивался. Согласно выводу авторов столь малые углы не влияют на MRT, а высокая скорость подачи материал при малых углах наклона может немного снизить MRT, однако при превышении предела пропускной способности печи происходят явления обратного потока. В исследовании [96] рассматривалось MRT для трех материалов: биоуголь, оливковые косточки, песок.

Лабораторные исследования с внутренними устройствами

Если снова обратиться к работе [137] и к работе [82], то можно отметить, что Sullivan не выделял в качестве переменной, которая вносит значительный вклад в MRT скорость подачи материала. Исследованию этого расхождения посвящена работа [109]. Так, согласно исследованию скорость вращения оказывает гораздо больший эффект на MRT, чем скорость подачи материала, что особенно заметно при высоких скоростях вращения. Однако стоит также отметить, что в работе [109] использовалась заслонка. Такая ситуация рассматривается в работе [81], в которой сообщается, что для вращающихся печей без заслонки на выходе скорость подачи оказывает лишь незначительное влияние на MRT, в то время как при использовании заслонки MRT существенно сокращается с увеличением скорости подачи. Говоря о работе [81], также необходимо отметить наблюдение авторов, что MRT уменьшается с увеличением диаметра цилиндра при условии отсутствия заслонки на выходе, в ином случае наблюдается противоположная тенденция.

Возвращаясь к теме использования заслонок на выходе печи, следует отметить результаты одного из первых исследований, посвященных влиянию геометрии на MRT [82], в которой сообщается, что время пребывания материала внутри цилиндра увеличивается при использовании заслонки, а также увеличивается при повышении её высоты. Выводы согласуются с результатами с другими материалами и рабочими параметрами [77; 132]. Однако в работе [83] отмечается, что при повышении скорости 2 об/мин, наблюдалось уменьшение MRT.

В работе [115] исследуется влияние осевых и кольцевых ребер. На MRT ощутимое влияние оказывают только кольцевые ребра достаточной высота, увеличивая его.

В работе [119] исследовалось влияние лопаток на MRT. Обнаружено, что лопатки увеличивают MRT за счет усиления обратного потока.

Уникальным исследованием является работа [80], которая посредством установки во вращающийся цилиндр конструкций в виде усеченных конусов разного диаметра имитирует образование обмазки. Авторы отмечают, что обмазка повышает MRT, причем кольцо, перекрывающее более 25–30% диаметра печи на расстоянии около 60–70% длины печи от загрузочного конца, приводит к практически полной невозможности эксплуатации из-за высокого уровня обратного выноса материала и значительного увеличения времени пребывания.

При более мелких кольцах эти эффекты ещё можно компенсировать увеличением скорости вращения. Более того, если в печи присутствует такое сужение, то общее MRT практически полностью определяется временем пребывания в области сужения. Это очень важные наблюдения, посвященные аспекту, который практически не изучен в литературе, но при этом зарастание печей и образование колец является реальной проблемой на многих печах цементной промышленности.

Промышленные эксперименты

Из работы [129], в которой анализируется работа реального агрегата видно насколько важен вопрос распределения времени пребывания в реальной трубчатой печи. Так, на примере печи № 7 видно, что MRT составляет 250 минут, при этом наиболее быстрее частицы проходили за 180 минут, а наиболее медленные за 300 минут. При этом авторы отмечают, что в печи отсутствовали кольца, поэтому это наблюдение подтверждает, что печь является смесителем. В работе [103] сообщается, что с повышением влажности шлама увеличивается время пребывания материала в печи, в среднем при изменении с 38% до 41% влажности время пребывания возросло с 258 до 272 минут. Также в работе [21] была получена матрица корреляций MRT и технологическими параметрами. В исследовании были рассмотрены следующие технологические параметры: температура отходящих газов, частота вращения печи, разрежение за печью, температура зоны кальцинирования, производительности печи, температура клинкера на выходе из печи, температура вторичного воздуха, площадь поверхности цепей.

1.4.5 Математическая модель высоты слоя материала

Модель по определению высоты слоя материала должны позволить рассчитать профиль изменения высоты слоя материала по длине печи. Далее будут рассмотрены опубликованные в научной литературе математические модели.

Одной из самых известных моделей расчета высоты слоя материала в трубчатых вращающихся печах в международной литературе является модель Saeman [130]. Представлена формулами (1.14-1.16).

$$\frac{dh}{dx} = \frac{3 \tan(\beta)M}{4\pi n \rho_{bulk}} (R^2 - (h - R^2)^{-\frac{3}{2}} - \frac{\tan(\beta)}{\cos(\alpha)} \quad (1.14)$$

$$h(0) = h_0 \quad (1.15)$$

$$h(0) = d_p \quad (1.16)$$

где M – массовый расход материала, кг/с,

h_0 – высота подпорного кольца или половина диаметра частицы, если кольцо отсутствует, м,

d_p – диаметр частицы, м.

Модель определена на основе геометрии и механизма движения твердых частиц и представляет собой нелинейное дифференциальное уравнение первого порядка, являющимся

задачей Коши. При этом оно обладает граничным условием так как x будет изменяться от 0 (выход печи) до некоторой L (место загрузки материала), то условие будут следующим. Высота материала на выходе будет равна высоте заслонки, если же заслонки нет, то диаметру частицы.

Модель была верифицирована в работах [116; 117] и при исследованных в работе условиях показала хорошее согласие с опытными данными. Однако также во многих работах сообщается и о серьезных отклонениях в показании модели от реального эксперимента [96]. Так, в этой работе предлагается использовать другие начальные условия. В частности, новый безразмерный критерий BDN – bed depth number (1.17).

$$BDN = \left(\frac{2 \arccos\left(1 - \frac{h(L)}{R}\right) - \sin\left(2 \arccos\left(1 - \frac{h(L)}{R}\right)\right)}{3.5\pi} \right)^2 \quad (1.17)$$

В работе [135] также поднимается вопрос определения граничных условий через безразмерный критерий. В исследовании была выведена следующая формула (1.18) для решения данной задачи.

$$BDN = \frac{0.75M \tan(\sigma)}{\pi n_s \rho_{bulk} R^3} \quad (1.18)$$

где ρ_{bulk} – насыпная плотность сыпучего материала, кг/м³,

σ – динамический угол откоса, рад,

n_s – скорость вращения печи, об/с.

Также в литературе можно найти множество корректировок данного уравнения под конкретную геометрию цилиндра. Так, в работе [134] исследовалось влияние порогов различной формы, расположенных внутри агрегата на профиль высоты слоя. Поэтому вид уравнения (1.19) и начальные условия (1.20) были скорректированы для учета внутренних конструкций при расчете.

$$\frac{dh}{dx} = \frac{3 \tan(\beta) Q_s}{4\pi n_s (R_i^2 - (R-h)^2)^{\frac{3}{2}}} - \frac{\tan(\alpha)}{\cos(\beta)} \quad (1.19)$$

$$h(0) = R - R_{dam} + d_p \quad (1.20)$$

где Q_s – объемный расход материала, м³/с,

R_{dam} – радиус внутренней перегородки, м.

Корректировка для предсказания поведения поток при анализе не сферических частиц древесной щепы представлено в работе [86], в которой вводятся три поправочных степенных коэффициента (1.21).

$$\frac{dh}{dx} = \frac{3 Q_s^{C_Q} \tan(\beta)}{4\pi n^{C_n} R^3} \left(\frac{2h}{R} - \frac{h^2}{R^2} \right)^{-\frac{3}{2}} - \frac{\tan^{C_\alpha}(\alpha)}{\cos(\beta)} \quad (1.21)$$

где C_Q – степенной коэффициент для объёмного расхода,

C_n – степенной коэффициент для скорости вращения,

C_α – степенной коэффициент для угла наклона печи,

n – скорость вращения печи, об/мин.

Однако у данной модели существует и полностью аналитическое решение, разработанное в работе [87] и обсуждаемое в исследовании [120] (1.22-1.29).

$$\begin{aligned} & (\cos(\varepsilon) - \cos(\varepsilon_0)) - \frac{2Hr_1}{(r_1-r_2)(r_1-r_3)} \frac{1}{\sqrt{r_1^2-1}} \times \left(\tan^{-1} \left(\frac{1-r_1 \tan(\frac{\varepsilon}{2})}{\sqrt{r_1^2-1}} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{1-r_1 \tan(\frac{\varepsilon_0}{2})}{\sqrt{r_1^2-1}} \right) \right) - \\ & \frac{2Hr_2}{(r_2-r_1)(r_2-r_3)} \frac{1}{\sqrt{r_2^2-1}} \times \left(\tan^{-1} \left(\frac{1-r_2 \tan(\frac{\varepsilon}{2})}{\sqrt{r_2^2-1}} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{1-r_2 \tan(\frac{\varepsilon_0}{2})}{\sqrt{r_2^2-1}} \right) \right) - \frac{2Hr_3}{(r_3-r_1)(r_3-r_2)} \frac{1}{\sqrt{r_3^2-1}} \times \\ & \left(\tan^{-1} \left(\frac{1-r_3 \tan(\frac{\varepsilon}{2})}{\sqrt{r_3^2-1}} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{1-r_3 \tan(\frac{\varepsilon_0}{2})}{\sqrt{r_3^2-1}} \right) \right) = X \end{aligned} \quad (1.22)$$

$$r_1 = \left(\frac{a}{b} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1.23)$$

$$r_2 = - \left(\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} i \right) \left(\frac{a}{b} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1.24)$$

$$r_3 = - \left(\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2} i \right) \left(\frac{a}{b} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1.25)$$

$$H = \frac{a}{b} \quad (1.26)$$

$$a = \frac{3 \tan(\beta) LM}{4\pi n_s R^4 \rho_{bulk}} \quad (1.27)$$

$$b = \frac{L \tan(\alpha)}{R \cos(\beta)} \quad (1.28)$$

$$X = \frac{bx}{L} \quad (1.29)$$

где H – безразмерный коэффициент,

ε – центральный угол, град,

r_i – i -ый корень кубического уравнения,

a – безразмерный коэффициент,

b – безразмерный коэффициент,

X – безразмерный коэффициент,

ε_0 – центральный угол на выходе из печи, град.

Также очень часто в литературе можно встретить формулу (1.30) из работы [104], которая основана на ранее рассмотренной модели Saeman.

$$\frac{dh}{dx} = \frac{\tan(\delta)}{\cos(\sigma)} - \frac{360Q_s \tan(\sigma)}{\pi f D_{вн}^3} \left(\frac{4h}{D_{вн}} - \left(\frac{2h}{D_{вн}} \right)^2 \right)^{-1.5} \quad (1.30)$$

где $D_{вн}$ – внутренний диаметр печи, м,

δ – наклон печи к горизонту, рад

f – скорость вращения, рад/с.

Принцип расчета данного уравнения и граничные условия будут аналогичны уравнению Saeman.

Менее распространенное в литературе, но также достаточно часто используемое уравнение (1.31) было предложено Ronco [105; 128].

$$\frac{dh}{dx} = \tan\left(\frac{4Q_s \sin(\alpha)}{2.623 \times 10^{-2} \pi f D_{\text{BH}}^3 Z^{0.75}} - \delta\right) \quad (1.31)$$

где Z – степень заполнения.

Отдельно стоит отметить модель движения материала, разработанную Ходоровым. По данной теме автор выпустил несколько монографий. Наиболее подробно механизм расчета осевого движения материала рассматривается в работе [64]. Так, в работе описано проведение промышленного эксперимента, в процессе которого на различных участках цементной мокрой печи определялись: насыпной вес материала, угол статического откоса, угол динамического откоса, осевая скорость движения материала, высота слоя материала. Измерение данных параметров позволило разработать подробную модель расчета осевых параметров движения материала. Именно в работе [64] представлен полный алгоритм расчета для всех участков печи с примером расчета. Разбиение на участки производилось в зависимости от изменения характеристик материала в ходе химико-физических превращений и различной геометрии печи. Так, в работе было выделено 10 участков, каждый из которых разделяется на некоторое количество небольших сегментов.

По аналогии с ранее рассмотренными моделями расчет начинается с выходного конца печи. В качестве начальных условий высоты материала предполагается, что высота материала $h(0)$ известна и в общем случае равна высоте подпорного кольца [65]. Поэтому первый расчет производится на выходном срезе. Первое, что необходимо сделать – это определить ускорение частицы в активном слое, которое определяется из баланса сил (1.32):

$$m_p g (\sin(\beta) - \tg(\varphi) \cos(\beta)) = m_p j_a \quad (1.32)$$

где m_p – масса частицы, кг,

g – ускорение свободного падения, м/с²,

j_a — ускорение частиц в активном слое, м/с².

Затем, зная ускорение можно вычислить параметр k_1 описывающий динамику движения частиц (1.33).

$$k_1 = 1 + 0.00257 \frac{60\varepsilon}{n} \sqrt{\frac{j_a}{D_{\text{BH}} \sin\left(\frac{\varepsilon}{2}\right)}} \quad (1.33)$$

Следует отметить, что в более поздней работе [65] при расчете данного коэффициента используется другая постоянная (1.34).

$$k_1 = 1 + 0.0013 \frac{60\varepsilon}{n} \sqrt{\frac{j_a}{D_{\text{вн}} \sin\left(\frac{\varepsilon}{2}\right)}} \quad (1.34)$$

Затем необходимо определить значение безразмерной функции углов $z(\alpha, \gamma, \beta)$ из уравнения объемного расхода материала, который определяется по формуле (1.35):

$$Q_s = \frac{k_1 \pi}{45} n z (2R - h)^{\frac{3}{2}} h^{\frac{3}{2}} \quad (1.35)$$

Вычислив z и зная динамический угол откоса β и угол наклона печи α можно определить γ . Для этого существует два способа. Первый – с помощью уравнения (1.36-1.38):

$$z = \cos(\gamma) \sqrt{\frac{\sin^2(\beta)(\cos^2(\gamma)(\sin^2(\beta) + 2 \sin(\alpha) \sin(\gamma) \cos(\beta)) - O - \sin^2(\gamma)E}{\sin^2 \beta (\sin^2(\alpha) - 2O) + E^2}} - 1 \quad (1.36)$$

$$O = \sin^2(\alpha) \cos^2(\gamma) + \sin^2(\gamma) \cos^2(\alpha) \quad (1.37)$$

$$E = \sin^2(\alpha) \cos^2(\gamma) - \sin^2(\gamma) \cos^2(\alpha) \quad (1.38)$$

Второй – с помощью графиков представленных в работах [64] и [65].

После того как будет определен γ в нулевой точке расчета производится шаг по оси в сторону холодного конца печи. Размер шага должен быть небольшим, в работе [64] шаг составлял $0^\circ 15'$. Тогда, зная γ для следующего шага расчет мы можем рассчитать новое значение z по уравнению (1.36).

А затем вычисляем изменение по оси x , которое будет соответствовать выбранному изменению угла. Если рассчитываемый участок печи не имеет внутренних устройств, то $k_2=1$. Если на данном участке отсутствует коническая часть печи, то $y=0$. В работе [64] представлены таблицы для данного коэффициента соответствующие определенному типу цепной навески и наличию пересыпающих лопастей (1.39).

$$\left(2R_{x_0} \pm (x_1 + x_2 + \dots + x_n) \operatorname{tg}(\gamma) - h_{x_0} \pm x_1 \operatorname{tg}(\gamma_{x_1}) \pm x_1 \operatorname{tg}(\gamma_{x_1}) \pm \dots \pm x_n \operatorname{tg}(\gamma_{x_n})\right) \cdot \left(h_{x_1} \pm (x_1 + x_2 + \dots + x_n) \operatorname{tg}(\gamma) \mp x_1 \operatorname{tg}(\gamma_{x_1}) \mp x_1 \operatorname{tg}(\gamma_{x_1}) \mp \dots \mp x_n \operatorname{tg}(\gamma_{x_n})\right) = \sqrt[3]{\left(\frac{45Q_s}{k_1 k_2 \pi n z x_n}\right)^2} \quad (1.39)$$

Где каждая величина с индексом x_i соответствует шагу x_i . Член $\operatorname{tg}(\gamma)$ имеет знак плюс, если конусная часть печи расширяется, в противном случае – минус. Если высота слоя увеличивается, то угол γ имеет знак плюс, а члены с $\operatorname{tg}(\gamma)$ в первой скобке – плюс, во второй – минус [64].

Тема учета влияния внутренних теплообменных устройств на осевые параметры движения будет также ещё раз затронута в разделе расчета осевой скорости движения материала.

Единственным неизвестным в данном уравнении является x текущего шага, как раз его и необходимо выразить из этого уравнения. Зная x и γ , можно определить изменение высоты слоя материала на данном шаге (1.40).

$$h_{x_n} = h_{x_0} \pm x_1 \operatorname{tg}(\gamma_{x_1}) \pm \dots \pm x_n \operatorname{tg}(\gamma_{x_n}) \quad (1.40)$$

Аналогичным образом производится расчет для всех шагов и всех участков от горячего к холодному концу печи. Алгоритм расчета на ЦВМ данной модели представлен в работе [16]. В другой работе [17] Ходоров и Аронзон предлагают способ упрощения расчета данной модели с помощью номограмм. В работе [55] разработан аналитический метод расчета параметров движения сыпучего материала во вращающихся барабанах в режиме качения, не требующий экспериментального определения динамического угла откоса материала.

Схожий принцип расчета автор также описывает в работе [65], однако имеются некоторые отличия в отдельных формулах. В частности, отличается формула расчета средней скорости и объемного расхода (1.41).

$$Q_s = h_{al} l_{al} z u_{al} \quad (1.41)$$

где l_{al} – длина хорды на половине высоты активного слоя, м,

h_{al} – толщина активного слоя, м,

u_{al} – поперечная скорость движения материала в активном слое, м/с.

Все ранее не упомянутые параметры: h_{al} , l_{al} , и u_{al} можно получить при совместном решении уравнений (1.42-1.47):

$$u_{al} = \sqrt{\frac{l_{al} j_a}{6}} \quad (1.42)$$

$$l_{al} = \left(D_{BH}^2 - \left(2 \left(\frac{D_{BH}}{2} - h \right) + h_{al} \right)^2 \right)^{0.5} \quad (1.43)$$

$$u_{pz} = \frac{\pi w}{60} (D_{BH} - h_{pz}) \quad (1.44)$$

$$h_{pz} = h - h_{al} \quad (1.45)$$

$$h_{pz} u_{pz} = h_{al} u_{al} \quad (1.47)$$

где w – вес гауссовского распределения,

h_{pz} – толщина пассивной зоны, м,

u_{pz} – поперечная скорость движения материала в пассивной зоне, м/с.

1.4.6 Математическая модель осевой скорости движения материала

Проводя обзор математических моделей осевой скорости движения материала прежде всего хочется отметить две работы, в которых уже представлены масштабные сравнения по данной теме. Так, это работа [122], более современная [21], а также в работе [64] приведено исчерпывающее сравнение с современниками книги. Данный раздел объединяет представленные в этих работах обзорные таблицы и дополняет их другими работами.

Как и в случае с экспериментами, первой работой посвященной определению осевой скорости движения материала в международной литературе является работа [137] (1.48).

$$u = N \frac{D_{\text{ВН}} n_s \alpha}{1.77 \sqrt{\beta}} \quad (1.48)$$

где N – коэффициент, учитывающий влияние подпорного кольца.

При этом как отмечает автор в работе [64], что данная формула не учитывает влияние на скорость движения условий динамики и коэффициента заполнения трубы материалом, а также не объясняет движение материала в горизонтальных барабанах. Коэффициент N может быть определен по трем эмпирическим формулам, которые также ограничивают применимость данного уравнения:

Если толщина равномерного слоя материала меньше высоты подпорного кольца (1.49):

$$N = e^{\left(\left(\frac{0.12L}{D_{\text{dam}}} - 3.86 \right) \lg \left(\frac{2.5V_m}{nv} \right) + e^{\left(2.3 - \frac{0.32L}{D_{\text{ВН}}} \right) - 1} \right) \frac{h}{D_{\text{ВН}} - 2h}} \quad (1.49)$$

где V_m – объем материала, м³,

n – скорость вращения печи, об/мин,

D_{dam} – диаметр отверстия подпорного кольца, м.

Если толщина равномерного слоя материала больше высоты подпорного кольца и последнее установлено в разгрузочном конце трубы (1.50):

$$N = \frac{1}{\left(0.34 - \frac{0.64D_{\text{ВН}}}{D_{\text{dam}}} \right) \frac{2.5V_m}{nv} + 1.16} \quad (1.50)$$

Если толщина равномерного слоя материала больше высоты подпорного кольца и последнее установлено не в разгрузочном конце трубы (1.51):

$$N = \frac{\frac{D_{\text{ВН}}}{D_{\text{dam}}} - \left(0.8 - 0.3 \frac{L}{D_{\text{ВН}}} \right)}{0.3 \frac{L}{D_{\text{ВН}}} + 0.195} \quad (1.51)$$

Из наиболее ранних работ также можно отметить работу [26], упомянутую в [64] и [21]. Так, скорость в ней представлена формула средней по сечению печи скорости движения материала для равномерного слоя (1.52).

$$u = \frac{\pi}{45} D_{\text{ВН}} n_s \frac{\sin^3 \left(\frac{\varepsilon}{2} \right)}{\varepsilon - \sin(\varepsilon)} \times \frac{\alpha + \lambda \cos(\mu)}{\sqrt{\sin^2(\beta) - \sin^2(\alpha)}} \quad (1.52)$$

где λ – Угол между ось печи и поверхностью материала, рад.

Эту тему развивает Bayard в работе [74], предложив теоретическое обоснование для фактора N , исходящее из предположения, что высота неравномерного слоя изменяется по закону прямой линии. В работе [64] сообщается, что данное предположение не соответствует действительности. Автор приводит две формулы (1.53, 1.54) для расчета осевой скорости.

Вне области действия подпорного кольца (1.53):

$$u = \frac{D_{\text{ВН}} n_s i}{0.308(24 + \beta)} \quad (1.53)$$

где i – наклон печи к горизонту, %.

В области действия подпорного кольца (1.54):

$$u = \frac{(D_{\text{вн}} - h - 0.5h_{\text{bf}})nizh_{\text{bf}}}{0.308(24 + \beta)(\sqrt{h_{\text{bf}}h + h})} \quad (1.54)$$

где h_{bf} – Высота слоя материала вне зоны влияния подпорного кольца, м.

Другой ранней работой является статья [131]. В оригинале представление данной формулы отличается, так как выражено через путь частицы в пастели. Данное представление формулы было получено в работе [64], что позволило автору напрямую сопоставить собственную модель (1.56) с моделью из статьи [131] (1.55).

$$u = \frac{\pi}{45} D_{\text{вн}} n \frac{\sin^3\left(\frac{\varepsilon}{2}\right)}{\varepsilon - \sin(\varepsilon)} \times \frac{\beta + \lambda \cos(\alpha)}{\sin(\alpha)} \quad (1.55)$$

$$u = k_1 k_2 \frac{\pi}{45} z D_{\text{вн}} n_s \left(\frac{\sin^3\left(\frac{\varepsilon}{2}\right)}{\varepsilon - \sin(\varepsilon)} \right) \quad (1.56)$$

Сравнивая напрямую оба уравнения автор [64] отмечает, что они отличаются в способе расчета z , а также то что в уравнении (1.55) отсутствуют коэффициенты учитывающие динамику и наличие внутренних теплообменных устройств.

В докторской диссертации Рывкина В.Д. [48] также была предложена формула для расчета скорости осевого движения частиц (1.57, 1.58).

$$u = 8.37 \frac{n_s}{\chi \varepsilon_r} F_h \sin(\kappa) \text{tg}(\delta) \quad (1.57)$$

$$F = 0.5 D_{\text{вн}} \sin\left(\frac{\varepsilon_r}{2}\right) \quad (1.58)$$

где F_h – половина хорды сегмента, занятого материалом, м,

χ – разность между динамическим и статическим углами естественного откоса материала, рад.

Поднимая тему теплообменных устройств наиболее подробное математическое описание движения материала в зоне цепей описано в кандидатской диссертации Абрамова В.Я. Разработанная формула основана на опытах, проведенных в реальных производственных условиях. Математический вывод и результаты эксперимента подробно описаны в работе [71]. Итоговое уравнения скорости движения пластичного материала в зоне цепной завесы выглядит так (1.59, 1.60).

$$u = k_3 D_{\text{вн}} n \text{tg}^{0.7}(Y) \left(\frac{F_c}{F_{ca}} \right)^{-0.3} \quad (1.59)$$

$$Y = \text{arctg} \left(\frac{S_1}{S_2} \right) \quad (1.60)$$

где Y – продольный угол гирлянды, град.,

$\frac{F_c}{F_{ca}}$ – плотность навески цепей, безразмерный.

Параметр k_3 отражает свойства материала. Для нефелиново-известняковой шихты в работе [71] принято значение 0.155.

В работе [105] проводится сравнение математической модели [137] с тремя более поздними формулами [128], [104] и [122] с использованием лабораторной установки (1.61-1.63).

$$u = 5.328D_{\text{BH}}f \tan(\sigma) \left(\frac{1}{\sin(\delta)} - \tan(\lambda) \frac{\cot(\delta)}{\tan(\sigma)} \right) \left(\frac{H}{D_{\text{BH}}} - \frac{H^2}{D_{\text{BH}}^2} \right)^{1.5} \left(\frac{1}{\varepsilon_r - \sin(\varepsilon_r)} \right) \quad (1.61)$$

$$u = 0.251D_{\text{BH}}f(\delta + \lambda) \frac{1}{Z^{0.25}} \left(\frac{1}{\sin(\sigma)} \right) \quad (1.62)$$

$$u = KD_{\text{BH}}f\delta \left(\frac{D_{\text{BH}}^2/4}{h^2 \cos(\sigma) + 2h(D_{\text{BH}}h - h^2)^{0.5} \sin(\sigma)} \times \frac{\varepsilon_r + 2 \tan(\varepsilon_r/2)}{1 - \cos(\varepsilon_r/2)} \right)^e \quad (1.63)$$

где δ – наклон печи к горизонту, рад,

ε_r – центральный угол, рад.

По полученным результатам можно сделать, что наилучшее предсказание осевой скорости показали модели [128] и [122].

Позже уравнение из работы [122] было модифицировано в статье [133] и приняло вид:

$$u = \left(\frac{0.09RQ^{0.946} \delta^{0.027} f^{0.045}}{h^{0.032}} \right) \left(\frac{R^2}{(h^2 \cos(\sigma) + 2h(2hr - h^2)^{0.5} \sin(\sigma))} \right) \left(\frac{\varepsilon + 2tg\left(\frac{\varepsilon}{2}\right)}{1 - \cos\left(\frac{\varepsilon}{2}\right)} \right)^{0.8} \quad (1.64)$$

Как раз в работе [122] были рассмотрены и приведены к единому виду математические модели осевой скорости движения опубликованный в международных источниках до 1990 года. Многие из них уже были рассмотрены при сравнении с работой [64]. Так, ещё в работе [122] рассмотрены уравнения Friedman [91] уравнение (1.63), Perry [124] уравнение (1.64), Zabloutny [144] уравнение (1.67) и Neiligenstaedt [98] уравнение (1.68).

$$u = 1.585Rf^{0.9} \varepsilon_r \quad (1.65)$$

$$u = 1.675Rftg(\varepsilon_r) \quad (1.66)$$

$$u = 0.735Rf^{0.85} \varepsilon_r^{0.85} \frac{1}{\sigma^{0.85}} \quad (1.67)$$

$$u = Rf \sin(\varepsilon_r) \frac{1}{\sin(\sigma)} \sqrt{1 - \frac{\sin^2(\varepsilon_r)}{\sin^2(\sigma)}} \quad (1.68)$$

Все модели (1.65-1.68) показали результаты хуже в сравнении с [128] и [122].

Схожие с ранее рассмотренными решениями подходы по расчету осевой скорости движения материала в трубчатых печах были предложен в книгах [40; 94; 106] (1.69-1.71).

$$u = D_{\text{BH}}n_s \frac{\sin^3\left(\frac{\varepsilon}{2}\right) \sin(\alpha)}{\sin(\beta) 90 \left(\frac{\varepsilon}{2\pi} - \frac{\sin\left(\frac{\varepsilon}{2}\right)}{2} \right)} \quad (1.69)$$

$$u = \frac{200D_{\text{BH}}n_s i}{\beta + 24} \quad (1.70)$$

$$u = 0.061 \frac{D_{\text{BH}}n\alpha}{\beta} \quad (1.71)$$

Все рассмотренные ранее уравнения весьма похожи между собой и основаны на схожих принципах, однако в литературе можно встретить и отличные подходы. Так, в статье [31] на основе опытов на промышленных агрегатах получена зависимость скорости движения

шихтового материала от изменения энтальпии шихты. Данная зависимость должна позволить определить степень влияния физико-химических изменения материала на его осевую скорость (1.72).

$$u = 2.3D_{\text{вн}} n_s \left(\frac{\alpha}{\beta}\right)^{0.85} \left(\frac{H_1}{H_2}\right) \quad (1.72)$$

где H_1 – энтальпия шихты на входе в печь, Дж,

H_2 – энтальпия шихты в рассматриваемой точке, Дж.

Уравнения в виде полиномиальной зависимости для определения скорости движения материала в различных зонах цементной печи был представлен в работе [20] и позе в книге [21] (1.73-1,76). Данный подход позволяет оценить влияние технологических параметров процесса обжига на характер движения материала в печи.

$$U_{c.z} = 0.0058T_{e.g} + 0.0062P + 4.79n - 5.13 \quad (1.73)$$

$$U_{d.z} = 0.335T_{e.g} - 0.006T_{c.z} + 0.0287P + 8.36n - 0.165L_{\text{ц}} - 5.42 \quad (1.74)$$

$$U_{s.z} = 38.7 - 0.02T_{e.g} - 0.0045T_{c.z} - 0.0156P - 0.153G_c - 0.0078T_{m.out} - 0.0057T_a \quad (1.75)$$

$$U_{max} = 0.18T_{e.g} + 0.196P - 0.027F_c + 0.368G_c - 0.0363T_a + 24.23 \quad (1.76)$$

где $T_{e.g}$ – температура отходящего газа, °С,

T_a – температура вторичного воздуха, °С,

$T_{c.z}$ – температура зоны кальцинации, °С,

$T_{m.out}$ – температура материала на выходе, °С

P – разрежение за печью, кгс/см²

G_c – масса цепной завесы, т,

$U_{c.z}$ – осевая скорость движения материала в цепной зоне, м/мин,

$U_{d.z}$ – осевая скорость движения материала в зоне декарбонизации, м/мин,

$U_{s.z}$ – осевая скорость движения материала в зоне спекания, м/мин,

U_{max} – максимальная осевая скорость движения материала, м/мин.

1.4.7 Математическая модель среднего времени пребывания материала

Среднее время пребывания материала неразрывно связано с осевой скоростью движения. Чтобы определить время пребывания через осевую скорость достаточно разделить пройденный материалом путь на осевую скорость (1.77).

$$MRT = \frac{L}{u} \quad (1.77)$$

Или же в интегральной форме (1.78, 1.79):

$$MRT = \int_0^L \frac{dx}{u(x)} \quad (1.78)$$

$$MRT = \int_0^L \frac{S(x)}{Q(x)} dx \quad (1.79)$$

Так, например, будет рассчитываться время пребывания материала по формуле из работы [137] и [131] (1.80, 1.81).

$$MRT = 1.77 \frac{L}{D_{BH}} \frac{\sqrt{\sigma}}{n\delta N} \quad (1.80)$$

$$MRT = \frac{L \sin(\beta)}{2Rni} \quad (1.81)$$

В случае модели [64] аналогичный расчет производится на различных сегментах печи, так как в реальной печи скорость движения будет меняться в зависимости от конкретной зоны из-за геометрии печи и физико-химических превращений материала под воздействием температуры.

Поэтому формулы скорости, которые ранее уже были рассмотрены не будут фигурировать в данном разделе. Так, ранее не рассматривалась зависимость предложенная в книге [123] (1.82, 1.83).

$$MRT = \frac{0.23L}{\delta n^{0.9} D_{BH}} \quad (1.82)$$

А также позже скорректированное в работе [96].

$$MRT = \frac{0.33L}{\delta n^{0.9} D_{BH}} \quad (1.83)$$

В докторской диссертации Рывкина В.Д. [48] также была предложена формула для расчета сиреневого времени пребывания частиц в печи (1.84), вместе с коэффициентом, учитывающим свойства материала (1.85).

$$MRT = k_{14} \frac{\varepsilon L}{\sin\left(\frac{\varepsilon r}{2}\right) D_{BH} n_s t g(\delta)} \quad (1.84)$$

$$k_{14} = 0.239 \frac{\chi}{\sin(\kappa)} \quad (1.85)$$

где κ – статический угол откоса, рад.

Константа в уравнении (72) была получена экспериментально на промышленных глиноземных печах [48]. В этой же работы были предложены упрощенные зависимости для случаев, когда определение высоты слоя материала, коэффициента заполнения и соответственно центрального угла не представляется возможным (1.86).

$$MRT = 860 + 5.5 \cdot 10^{-5} \frac{L}{D_{BH}} n_s Q t g(\delta) \quad (1.86)$$

где Q – объемный расход материала, м³/ч.

Время пребывания для печей с небольшим углом наклона (0.5° – 1°) отдельно исследуется в статье [150], так как по результатам полученным рассмотренные примеры из литературы не показали достаточно точного результата в данном диапазоне (1.87). В статье проводилось сравнение с работой [137].

$$MRT = 1.53 \frac{L\sqrt{\beta}}{D_{BH}n} \quad (1.87)$$

Также в литературе представлено множество степенных зависимостей для расчета среднего времени пребывания материала в печи (1.88). Одной из первых работ в данном направлении является [82].

$$MRT = K \frac{L^3}{Q_m} \left(\frac{\beta}{\alpha}\right)^{1.054} \left(\frac{Q_m}{L^3 n}\right)^{0.981} \quad (1.88)$$

где Q_m – объемный расход материала, м³/мин,
 K – безразмерный коэффициент.

Позже автор расширяет данную зависимость с учетом геометрических параметров трубы в работе [81]. Полученная зависимость весьма широко обсуждается в научной литературе. В том числе в работе [96] обсуждается корректировка коэффициентов данного уравнения. Модель не учитывает температурные изменения материала (1.89).

$$MRT = \frac{0.1026L^3}{Q_m} \left(\frac{\sigma}{\delta}\right)^{1.054} \left(\frac{Q_m}{L^3 n}\right)^{0.981} \left(\frac{L}{D_{BH}}\right)^{1.1} \quad (1.89)$$

$$MRT = \frac{0.38L^3}{Q_m} \left(\frac{\sigma}{\delta}\right)^{1.054} \left(\frac{Q_m}{L^3 n}\right)^{0.981} \left(\frac{L}{D_{BH}}\right)^{1.1} \quad (1.90)$$

Аналогично ей для наклонных цилиндров был предложен ряд зависимостей в работах [107; 132; 133] соответственно уравнения (1.91-1.93).

$$MRT = \frac{1.4215h_0^{0.241}}{\delta^{0.986} f^{0.875} Q^{0.059} d_p^{0.05}} \quad (1.91)$$

$$MRT = \frac{1315.2h_0^{0.24}}{\alpha^{1.02} n^{0.88} M_h^{0.072}} \quad (1.92)$$

$$MRT = k_5 \frac{L \sin(\sigma)}{2\pi R n_s (tg(\delta) + \cos(\sigma) tg(\mu)) \cos^2(\mu)} \quad (1.93)$$

где M_h – массовый расход, кг/ч.

Для горизонтальных цилиндров в работе [138] была представлена следующая зависимость (1.94):

$$MRT = 0.91 \left(\frac{L}{D_{BH}}\right)^2 \left(\frac{D_{BH}}{h(0)}\right)^{0.6} \frac{tg(\beta)}{n} \quad (1.94)$$

Отдельно следует выделить продолжение работы [81] – статью [80], в которой авторы пытаются проанализировать влияние внутренних сужений имитирующих образование обмазки внутри трубчатой печи. Из всех рассмотренных публикаций в данной работе только эта предпринимает попытку оценить влияние образования обмазки внутри печи на осевые параметры движения материала. В работе не приводится формула расчета осевой скорости, однако предлагается способ расчета эффективного угла откоса, в котором учитывается наличие внутренних сужений.

Вопрос вычисления среднего времени пребывания рассматривается в печах с lifter исследуется в работе [78] (1.95).

$$MRT = k_6 \sqrt{gL} \left(\frac{n^2 D_{BH}}{g} \right)^{k_7} \left(\frac{D_{ex}}{D_{BH}} \right)^{k_8} \left(\frac{\beta}{\alpha} \right)^{k_9} \left(\frac{M_h}{\rho_{bulk} D_{BH}^2 \sqrt{gL}} \right)^{k_{10}} \left(\frac{4S_{lift}}{\pi D_{BH}^2} \right)^{k_{11}} \left(\frac{\rho_{bulk}}{\rho_{tapped}} \right)^{k_{12}} \left(\frac{L}{D_{BH}} \right)^{k_{13}} \quad (1.95)$$

где k_6 – безразмерный коэффициент,

D_{ex} – эффективный выходной диаметр, м

ρ_{tapped} – плотность спрессованного материала, кг/м³,

S_{lift} – площадь, занимаемая твердыми частицами в лопасти при горизонтальном положении, м².

По-другому пути пошли авторы работ [20; 21], которые выразили среднее время пребывания в реальной цементной печи через рабочие параметры процесса в виде полиномиальной зависимости (1.96).

$$MRT = 337.1 - 0.217T_{e.g} - 0.706P - 294n - 1.92M_m - 0.0363T_m - 0.00358T_a + 24.23 \quad (1.96)$$

где M_m – производительность печи, т/ч,

T_a – температура вторичного воздуха, °С.

1.4.8 Выводы по разделу

В данном разделе было рассмотрено подавляющее большинство математических моделей осевого движения материала представленных в научной литературе. Несмотря на активное использование модели [104] в международной литературе, наиболее полно процесс движения материала в реальной ТВП описывает модель предложенная Ходоровым Е.И. [64] в сочетании с уравнением Абрамова [1] для цепной зоны печи, однако как уже и отмечалось ранее в работе, в моделях не учитывается ФРП, изменившаяся в результате образования обмазки. Данную модель следует взять за основу при разработке подхода, который позволит учитывать влияние ФРП.

1.5 Выводы по главе 1

По результатам литературного обзора, проеденного в данной главе, можно сделать следующие выводы:

1. Важным отличием печей для спекания нефелинового концентрата от широко описанных в литературе цементных печей является возврат пыли в горячий конец печи, что обусловлено селективностью пылеуноса. Кроме того, параметр расхода пыли является одним из основных управляющих параметров объекта. Таким образом, двухстороннее питание печи должно быть учтено на всех этапах расчета комплексной модели.

2. ТВП для спекания нефелинового концентрата с известняком оборудована цепной завесой. На данном участке необходимо принять в качестве допущения, что происходит только испарение жидкости и выделить в её в расчёте в отдельную модель в составе комплексной модели расчета.

3. Тема влияния обмазки на параметры осевого движения материала в ТВП недостаточно раскрыта в научной литературе. Требуется проведение экспериментов на физической модели объекта.

4. Обмазка может иметь различную форму и локализацию внутри профиля печи, поэтому одним из требований к разрабатываемой физической модели процесса движения материала в ТВП является возможность упрощенного изменения ФРП барабана печи.

5. На основе анализа профилей обмазки из литературы было выбрано четыре типа типовой геометрии для реализации в физической модели объекта: «Прямая», «Сужающаяся», «Кольцо», «Реалистичная»

6. ТВП как объект управления является объектом с распределёнными параметрами из-за чего внесение управляющего воздействия для стабилизации параметров в одной зоне печи становится возмущающим параметром для другой зоны печи. Отдельно необходимо отметить расход топлива так как из всех возможных управляющих параметров наибольшие изменения в тепловой режим работы печи вносит именно изменение топлива.

7. Несмотря на то, что на сегодняшний день параметр толщины обмазки относится к неконтролируемым возмущениям на большинстве предприятий, существуют готовые решения, которые позволяют измерять его с достаточной точностью в реальном времени. Поэтому в разрабатываемой системе управления данный параметр будет считаться известным.

8. Комплексная прогнозная модель должна учитывать изменение осевой скорости движения материала в печи из-за изменения свойств материала в результате протекания физико-химических превращений.

9. Наиболее полно движение материала в ТВП описывает модель, предложенная Ходоровым Е.И. Её следует взять за основу при разработке модели, учитывающей изменение ФРП в результате образования колец и обмазки.

ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИИ ОБМАЗКИ НА ОСЕВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ДВИЖЕНИЯ СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА

2.1 Задачи, решаемые в данной главе

Согласно выводам, изложенным в первой главе, в научной литературе не представлено математической модели расчета осевых параметров движения сыпучего материала в трубчатой вращающейся печи, учитывающих локальные изменения ФРП печи в результате образования обмазки, а экспериментальные данные представлены весьма ограничено. Среди работ рассмотренных в рамках литературного обзора исключение составляет только исследование [80].

В данной главе предпринята попытка разработки математической модели влияния геометрии обмазки на осевые параметры движения сыпучего материала на основе результатов лабораторных экспериментов. Процесс разработки модели можно разделить на ряд задач:

1. Разработка физической модели осевого движения материала в трубчатой вращающейся печи с учетом влияния изменения геометрии рабочего пространства печи в результате образования обмазки.
2. Разработка метода определения осевых параметров движения сыпучего материала: среднего времени пребывания и толщины слоя материала.
3. Анализ результатов эксперимента.
4. Математическое описание полученных результатов.

2.2 Методология эксперимента

2.2.1 Постановка задачи и условий физического моделирования

Основной целью экспериментов на физической модели является определение влияния ФРП печи, с учетом образовавшейся обмазки, на параметры осевого движения материала. Для достижения данной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Соблюдение критериев подобия движения материала в физической модели реальному объекту;
2. Определение выходных параметров, которые позволят описать процесс осевого движения материала;
3. Определение формы рабочего пространства модели, которая позволит имитировать форму рабочего пространства печи.

Первым основным критерием является нахождение материала в режиме качения (рисунок 1.10), характерного для трубчатых вращающихся печей [65; 99]. Как уже отмечалось ранее данный режим характеризуется наличием двух областей: пассивной зоны и активного слоя, а траекторию движения частиц можно разделить на два этапа: подъем, когда частица сравнительно медленно поднимается по стенке печи (пассивная зона), и быстрый скат вниз при достижении

определенного угла и открытой поверхности (активный слой). При этом согласно книге [65] «Продвижение частиц материала вдоль оси печи происходит только во время их падения. Во время подъема частиц они не перемещаются вдоль оси печи». Таким образом, поддержание режима качения в ходе эксперимента является ключевым критерием подобия.

Из него уже происходит несколько других критериев, определяющих данный режим движения. Согласно работе [99] можно отметить Число Фруда (2.1) и степень заполнения материалом (1.12).

$$\text{Fr} = \frac{\omega^2 R}{g} \quad (2.1)$$

где ω – угловая скорость вращения 1/с.

Однако в той же работе [99] авторы отмечают, что в зависимости от свойств материала при одних и тех же значениях Числа Фруда, степени заполнения и близких размерах частиц режим качения может начинаться при значительно более низких скоростях. Другими словами, на переход процесса в режим качения влияют и многие другие параметры. Работа [113] развивает данное направление и приводит перечень граничных условий для поперечного движения: Число Фруда, степень заполнения, коэффициент трения, угол внутреннего трения, статический угол естественного откоса, динамический угол естественного откоса, отношение диаметра частиц к диаметру печи. Однако все эти параметры являются критериями именно поперечного движения т.е. описывают переходы между режимами. В контексте же осевого движения из данного исследования в первую очередь важен именно режим движения, так как он напрямую связан со скоростью осевого движения частиц и соответственно с временем пребывания материала в печи. Для того чтобы гарантировать, что выбранные условия эксперимента позволяют поддерживать именно режим движения качение, была реализована отдельная лабораторная установка для анализа поперечного движения частиц. При этом корпус в ней был выполнен из того же материала, что и корпус барабана в физической модели осевого движения, а также диаметр её барабана был равен диаметру барабана осевой модели движения. Все это позволяет сделать вывод, опираясь на критерии из работы [113], что если в лабораторной установке для анализа поперечного движения материала наблюдается режим движения качение, то при такой же скорости движения, степени заполнения и с тем же сыпучим материалом в физической модели осевого движения будет также наблюдаться данный режим.

Вторым критерием, который был принят при разработке физической модели является степень заполнения. Несмотря на то, что она только что была рассмотрена как один из параметров, характеризующих режим качения, её можно рассмотреть и как критерий осевого движения. Так, одним из главных параметров осевого движения является профиль высоты слоя сыпучего материала, который можно представить в виде профиля степени заполнения, как это

сделано в работе [80]. Поэтому при рассмотрении осевых параметров движения выбирались значения степени заполнения характерные для реальных трубчатых вращающихся печей.

Третьим критерием является угол наклона печи. Согласно работе [113] он не влияет на поперечное движение и установление режима качения, однако является одним из критериев подобия при анализе осевого движения. Поэтому для данного параметра также выбирались значения характерные для реальных вращающихся печей.

Четвертый и последней рассматриваемый критерий – соотношение длины и диаметра трубы. В реальной печи оно зачастую значительно превышает 20. В случае же физической модели за ориентир были взяты несколько других работ посвященные лабораторному исследованию осевых параметров. Для примера можно выделить следующие работы: [136] – соотношение 9.7, [80] – соотношения 6.67 и 16, [64] – соотношение 5.4.

Для описания осевого движения материала используется два основных параметра: профиль высоты слоя материала и среднее время пребывания. Соответственно разрабатываемая физическая модель должна иметь возможность измерить данные параметры.

В первой главе уже были представлены несколько графиков толщины обмазки по длине слоя в безразмерном виде (рисунок 1.5 – 1.9). На основе анализа графиков было выделено четыре возможных типа изменения ФРП: «Прямая», «Сужающаяся», «Кольцо», «Реалистичная».

Таким образом, разрабатываемая физическая модель должна иметь возможность имитировать все четыре типа геометрии рабочего пространства печи.

2.2.2 Конструкции физической модели

Была разработана лабораторная установка для определения среднего времени пребывания материала, распределенного времени пребывания материала и профиля высоты слоя материала в трубе с локальными сужениями (рисунок 2.1-2.3).

Устройство (рисунок 2.1, рисунок 2.4) представляет собой полый цилиндрический корпус 2 из сегментов 1, смонтированный с возможностью разбора и замены отдельных участков. На внешней поверхности сегментов 1 расположены выступы 27, которые используются для фиксации корпуса 2 на роликовых опорах 6. В центре корпуса 2 расположен сегмент 3 выполненный в виде колеса зубчатой передачи. В правой части корпуса 2 расположен лоток 4 для выгрузки сыпучего материала. В левой части корпуса 2 расположена стенка 5. Колесо зубчатой передачи 3 соприкасается с шестерней зубчатой передачи 10, которая соединена через вал 9 с двигателем 12, расположенным в стойке 8. На конце вала 9 закреплен энкодер 7. Напротив стенки 5 расположена стойка 17, на которой закреплен корпус шнекового питателя 15, внутри которого закреплен шнек 16. К корпусу шнекового питателя 15 прикреплен желоб подачи 14. Над корпус шнекового питателя 15 расположен бункер 18. Энкодер 7 соединен с

микроконтроллером Arduino Uno 23, который соединен с драйвером BTS 7690 24. Драйвер 24 и микроконтроллер 23 расположены внутри управляющего блока 21. Микроконтроллером Arduino Uno 25, соединен с драйвером BTS 7690 26, который подключен к двигателю шнека 20. Драйвер 26 и микроконтроллер 25 расположены внутри управляющего блока 22. Все конструкция расположена на подставке 13.

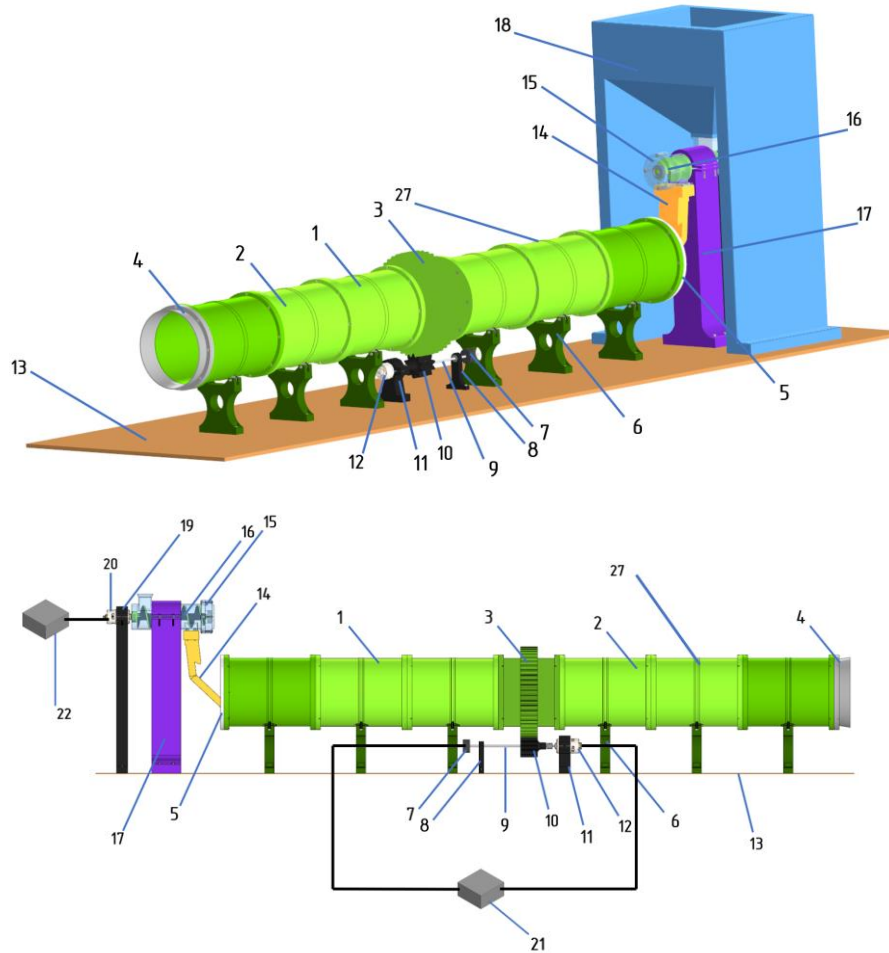


Рисунок 2.1 – Конструкция физической модели осевого движения (составлено автором)

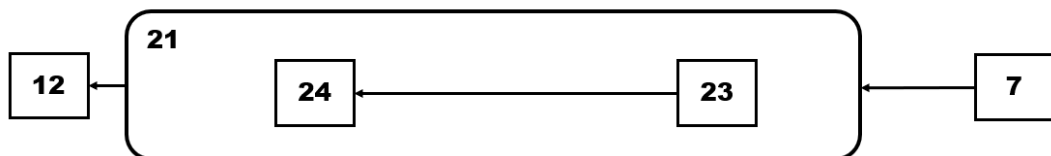


Рисунок 2.2 – Устройство управляющего блока 21 (составлено автором)

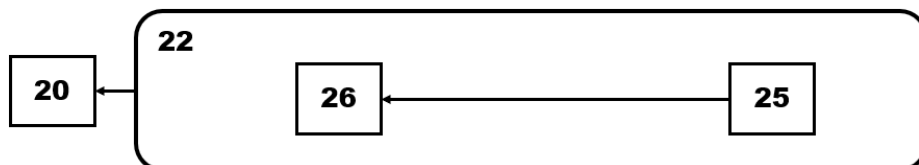


Рисунок 2.3 – Устройство управляющего блока 22 (составлено автором)



Рисунок 2.4 – Физическая модель осевого движения материала в ТВП (фото автора)

Система регулирования скорости вращения барабана построена по принципу замкнутого контура с использованием ПИД-регулятора, реализованного на базе Arduino Uno (23). Фактическая скорость вращения определяется по сигналу с энкодера (7), установленного на валу (9) двигателя (12), и сравнивается с заданным значением. На основе рассогласования ПИД-регулятор генерирует широтно-импульсный сигнал (ШИМ), управляющий драйвером двигателя BTS 7690 (24), тем самым обеспечивая поддержание заданной скорости вращения. Заданная скорость вращения выбирается в зависимости от исследуемого материала, таким образом, чтобы материал во время движения находился в режиме качения. Обоснование почему выбирается данный режим и чем он характеризуется представлено в первой главе. Сыпучий материал загружается в бункер 18, а потом с помощью шнека 15 подаётся внутрь корпуса 2.

В разработанном устройстве прежде всего следует отметить сегментную конструкцию барабана, которую прежде не использовали ни в одной из рассмотренных в первой главе работ. Данное конструктивное решение в сочетании с применением аддитивных технологий 3D-печати позволило сравнительно легко изменять геометрию рабочего пространства модели, путем замены сегментов.

2.2.3 Критерии подобия физической модели

Степень заполнения в зоне загрузки была принята равной 12.4%, что соответствует реальной степени заполнения в ТВП, а также согласно работе [113] позволяет добиться движения материала в режиме качения. Угол наклона барабана был реализован с помощью небольших подпорок, не варьировался в ходе экспериментов и составлял 1° , что соответствует реальным

промышленным значениям. Соотношение длины и диаметра барабана равнялось 9.47, что соответствует рассмотренным ранее физическим моделям осевого движения [89].

Последним критерием подобию является достижения поперечного режима движения материала *rolling* в физической модели. Для выбора значения параметров, которые позволят обеспечить данный режим движения была разработана лабораторная установка для исследования поперечного движения материала.

Устройство (рисунок 2.5, рисунок 2.6) [44; 45] представляет собой полый цилиндрический корпус 4 из сегментов 13. Корпус 4 расположен на роликовых опорах 6. В центре корпуса 4 расположен сегмент 5 выполненный в виде колеса зубчатой передачи. В левой части корпуса 4 расположена прозрачная стенка из органического стекла 3 для наблюдения за поперечным движением материала. Колесо зубчатой передачи 5 соприкасается с шестерней зубчатой передачи 8, которая соединена через вал 10 с двигателем 9, расположенным в стойке 12. На конце вала 10 закреплен энкодер 7. Энкодер 7 соединен с микроконтроллером Arduino Uno, который соединен с драйвером BTS 7690. Напротив, прозрачной стенки из органического стекла закреплен штатив 2, в котором размещена web-камера 1. Вся конструкция расположена на подставке.

Система регулирования скорости вращения барабана построена по принципу замкнутого контура с использованием ПИД-регулятора, реализованного на базе Arduino Uno. Фактическая скорость вращения определяется по сигналу с энкодера 7, установленного на валу 10 двигателя 9, и сравнивается с заданным значением. На основе рассогласования ПИД-регулятор генерирует широтно-импульсный сигнал (ШИМ), управляющий драйвером двигателя BTS 7690, тем самым обеспечивая поддержание заданной скорости вращения. Заданная скорость вращения выбирается в зависимости от исследуемого материала, таким образом, чтобы материал во время движения находился в режиме *rolling*. При вращении барабана 4 web-камера 1 производит передаёт видеопоток на одноплатный компьютер Raspberry Pi, на котором реализована система технического зрения, позволяющая определить динамический угол откоса материала (рисунок 2.7).

Таким образом, данная установка позволяет не только подобрать параметры движения, которые позволят поддержать режим качения, но и с помощью разработанного ПО на основе машинного зрения автоматически определять динамический угол естественного откоса, исследуемого материала, который является важной характеристикой в контексте данного исследования.

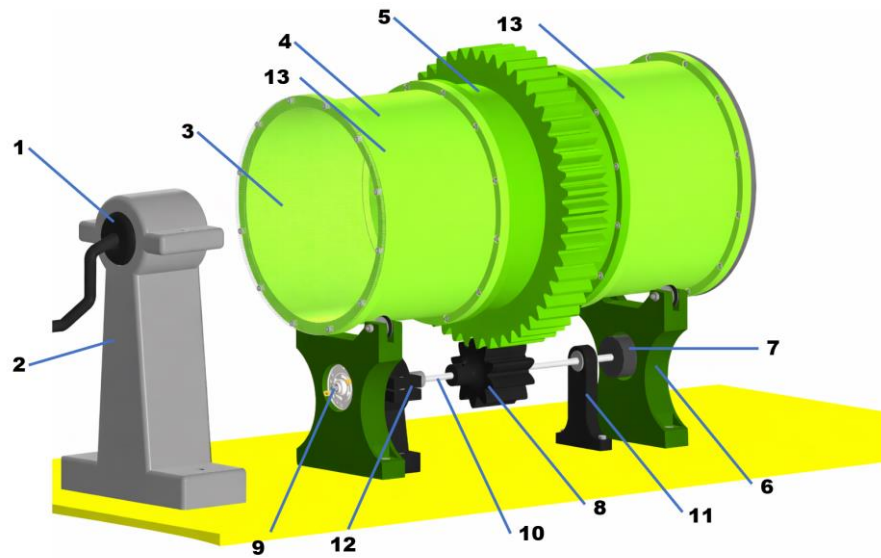


Рисунок 2.5 – Лабораторная установка для исследования поперечного движения материала
(составлено автором)



Рисунок 2.6 – Лабораторная установка для исследования поперечного движения материала
(фото автора)

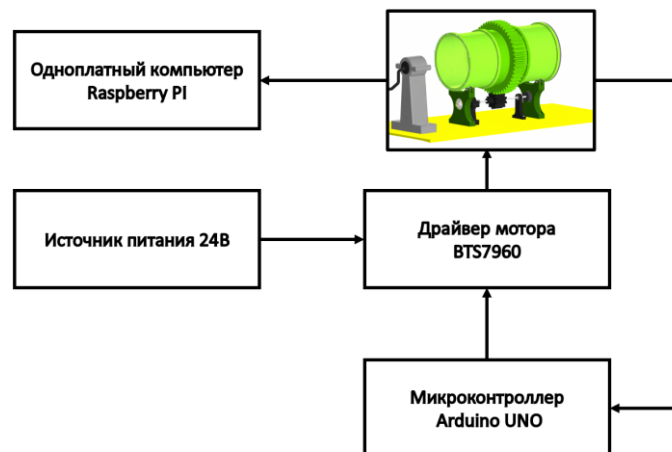


Рисунок 2.7 – Подключение внешних устройств к установке (составлено автором)

Система технического зрения включает цифровую камеру, фиксированную относительно боковой поверхности барабана, и программный модуль предварительной обработки, реализованный на языке Python с использованием библиотеки OpenCV. Поток изображения ограничивается круглой маской, соответствующей внутренней проекции барабана, после чего выполняется пороговая сегментация в пространстве RGB с интерактивной настройкой диапазонов цветовых компонент. Для улучшения качества сегментации применяются морфологическая операция замыкания, обеспечивающая устранение мелких разрывов и объединение областей материала, а также гауссово сглаживание для подавления шумов. В результате формируется бинарная маска, на которой материал представлен сплошной белой областью на чёрном фоне; маска сохраняется в виде последовательности изображений и в формате видеофайла, что обеспечивает возможность как покадрового, так и ускоренного анализа. На этапе обработки полученного видео выполняется преобразование изображения в оттенки серого, автоматическая бинаризация методом Оtsu и морфологическая фильтрация для удаления случайных шумов, после чего определяется профиль свободной поверхности материала путём нахождения для каждого вертикального столбца изображения координаты самой верхней белой точки. Полученный профиль аппроксимируется прямой линией методом робастной линейной регрессии с исключением выбросов на основе медианного абсолютного отклонения. Наклон аппроксимирующей прямой относительно горизонта используется для вычисления динамического угла откоса β по выражению (2.2):

$$\beta = \arctan(|c|) \frac{180}{\pi} \quad (2.2)$$

где c – угловой коэффициент аппроксимирующей прямой.

Для уменьшения случайных колебаний временной ряд значений подвергается сглаживанию экспоненциальным скользящим средним с коэффициентом 0.2. По завершении обработки рассчитывается среднее значение угла (2.3):

$$\bar{\beta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \beta_i \quad (2.3)$$

и стандартное отклонение (2.4):

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\beta_i - \bar{\beta})^2} \quad (2.4)$$

где n – количество измерений,

β_i – значение угла на i -м кадре.

Результаты представляются в виде временной зависимости угла, гистограммы его распределения и итогового значения в формате $\theta \pm \sigma$.

Ниже на рисунке 2.8 представлен пример работы программы. Результатом работы программы для этого видеопотока стало 23.6 ± 0.8 .

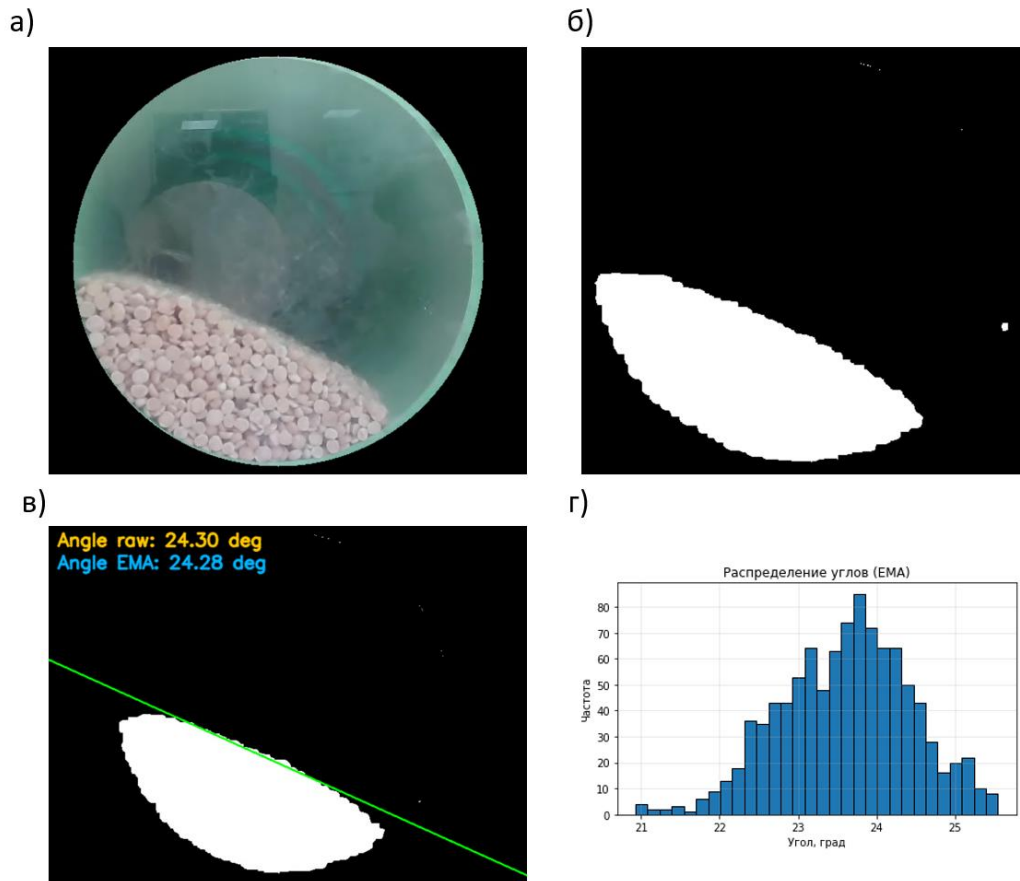


Рисунок 2.8 – Работа программного обеспечения установки по определению динамического угла откоса (составлено автором)

2.2.4 Выходные параметры физической модели

Первым выходным параметром являлся профиль высота слоя материала по длине печи. Для измерения данного параметра была разработана измерительная система на основе измерительных устройств TOF050C (рисунок 2.9), которые были в количестве 22 устройств закреплены на одинаковом расстоянии друг от друга на металлическом профиле, который был закреплен с возможностью съема на опоры, расположенных на концах загрузки и выгрузки соответственно (рисунок 2.10).

Измерительные устройства по протоколу I2C были подключены к Arduino Nano с использованием трех мультиплексоров PCA9458A. Так как у данных измерительных устройств наблюдается постоянная систематическая погрешность, а металлический профиль, на котором закреплены датчики, имеет небольшое провисание необходима калибровка используемой измерительной системы перед каждым экспериментом. Процедура калибровки включала размещение измерительного профиля внутри пустого барабана после чего на основе показаний датчиков задавалось постоянное смещение показаний для каждого датчика, таким образом, чтобы каждый показывал нулевое значение в пустом барабане (рисунок 2.11).



Рисунок 2.9 – Измерительное устройство TOF050C, закрепленное на металлическом профиле
(фото автора)

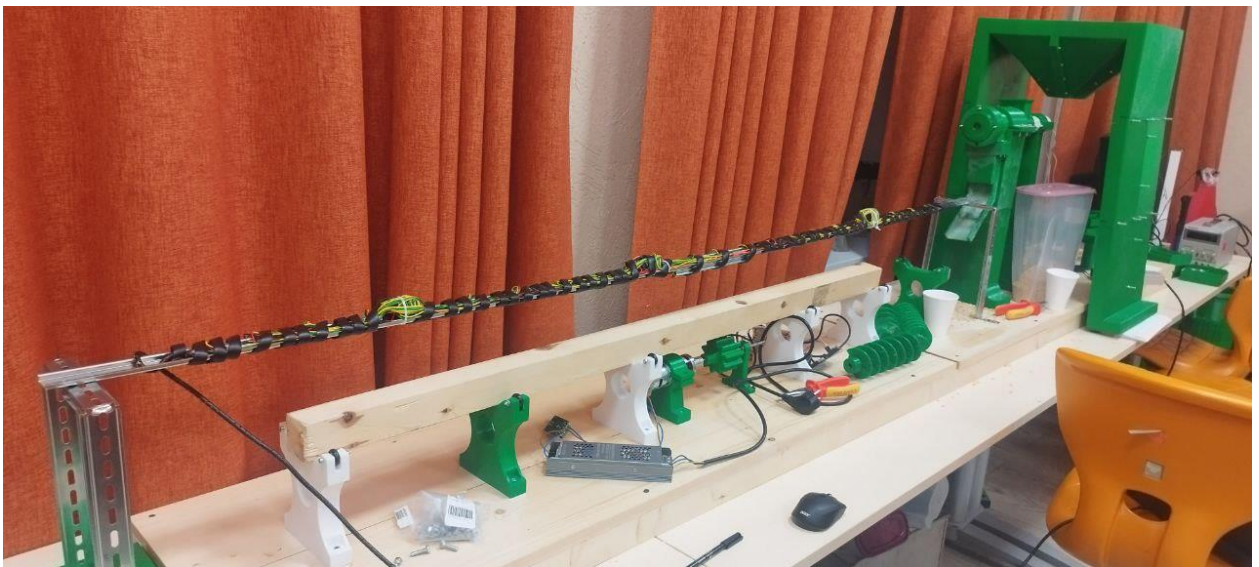


Рисунок 2.10 – Способ крепления измерительной системы внутри физической модели
(фото автора)



Рисунок 2.11 – Результат калибровки измерительного профиля в пустом барабане
(составлено автором)

Измерение движения высоты слоя материала необходимо проводить в установившемся режиме движения, когда расход входного потока материала равен выходному потоку (рисунок 2.12). Откалиброванный профиль должен быть извлечен из барабана в процессе движение материала из-за активного пыления материала, что приводит к искажению показаний измерительной системы. После достижения установившегося режима движения вращение

барабана и подача материала устанавливались, а внутрь барабана устанавливалась измерительная система.



Рисунок 2.12 – Измерение высоты профиля материала (фото автора)

После компенсации смещения нуля датчиков основная погрешность измерения носит случайный характер и характеризуется стандартным отклонением. По результатам серии измерений величина стандартного отклонения составляет порядка 1.73 мм, что соответствует диапазону ± 3.47 мм для доверительного интервала 95%.

Для измерения среднего времени пребывания материала использовался метод трассирующих частиц. В качестве трассера использовался основной сыпучий материал опыта окрашенный ферромагнитной краской (рисунок 2.13).



Рисунок 2.13 – Материал опыта (слева) и трассирующий материала (справа) (фото автора)

Данное решение позволило сравнительно легко отделять трассирующий материал от основной массы и при этом не вызвало значительных изменений в его свойствах, влияющих на осевое движение материала (насыпная плотность, статический и динамический угол естественного откоса материала).

При определении среднего и распределенного времени пребывания сначала достигался установившийся режим движения материала с использованием неокрашенного материала. После достижения установившегося режима движения в шнековый питатель подавался окрашенный материал (рисунок 2.14). После бункер незамедлительно пополнялся неокрашенным материалом (рисунок 2.15).



Рисунок 2.14 – Загрузка трассирующего материала в бункер (фото автора)



Рисунок 2.15 – Движение трассирующего материала в барабане (фото автора)

Материал на выходе разделялся на пробы раз в 5 секунд. Отбор завершался после выхода всех окрашенных частиц материала из физической модели. Затем из материала каждой пробы отделялись все окрашенные частицы с помощью неодимовых магнитов (рисунок 2.16).

Затем определялась масса трассирующего материала в каждой порции с помощью лабораторных весов M-ER 122 ACFJR с максимальным весом 0.3 кг и точностью измерения 0.005 г (рисунок 2.17).

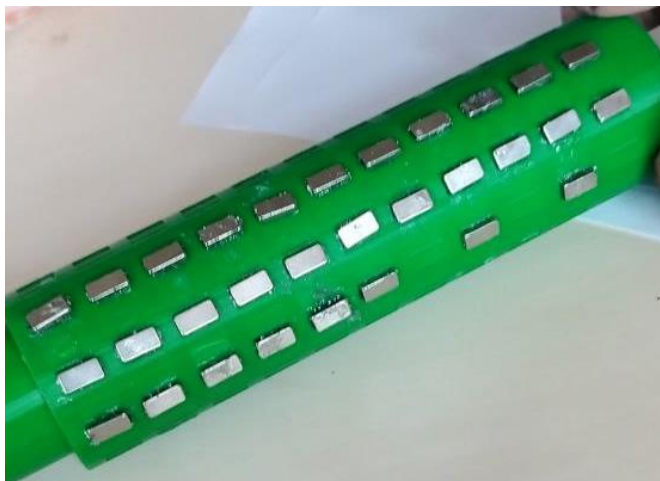


Рисунок 2.16 – Магниты для отбора материала (фото автора)



Рисунок 2.17 – Лабораторные весы M-ER 122 ACFJR (фото автора)

2.2.5 Форма рабочего пространства физической модели

Для имитации обмазки четырех типов, а также реализации участков, где обмазка отсутствует было спроектировано пять типов геометрии сегментов. Каждый тип геометрии, за исключением нулевого, включает в себя несколько сегментов различной толщины. А также для нулевого типа геометрии выполнены и версии сегментов с колесом зубчатой передачи. Геометрические параметры всех реализованных сегментов представлены в Таблице 2.1. Далее для краткости будет использоваться обозначение T.N.x, где буква T – означает, что речь идет о типе геометрии, N – номер типа (от нулевого до четвертого), x – это порядковый номер сегмента (рисунок 2.18).

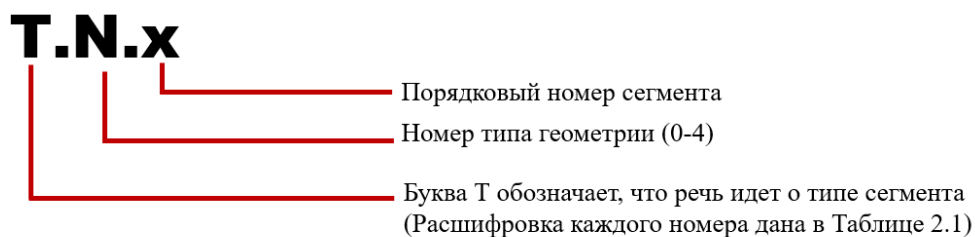


Рисунок 2.18 – Обозначение сегментов (составлено автором)

Таблица 2.1 – Параметры сегментов (по данным автора)

Обозначение	Длина, мм	Внутренний диаметр, мм	Внешняя форма	Примечание
Нулевой тип геометрии				
T.0.1	270	190	Стандартный	Обмазка отсутствует
T.0.2	180	190	Зубчатое колесо	
Первый тип геометрии				
T.1.1	270	171	Стандартный	Обмазка одинаковая на всем протяжении сегмента
T.1.2	270	152	Стандартный	
T.1.3	270	140	Стандартный	
T.1.4	270	95	Стандартный	
Второй тип геометрии				
T.2.1	270	190-170.6	Стандартный	Обмазка линейно утолщается на протяжении всего сегмента
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	Обмазка линейно утолщается на протяжении первых 198 мм, затем обмазка становится нулевой
Третий тип геометрии				
T.3.1	270	190/114/190	Стандартный	Внутри сегмента расположено кольцо протяженностью 27 мм
T.3.2	270	190/152/190	Стандартный	Внутри сегмента расположено кольцо протяженностью 54 мм
T.3.3	270	190/114/190	Стандартный	
T.3.4	270	190/114/190	Стандартный	Внутри сегмента расположено кольцо протяженностью 81 мм
Четвертый тип геометрии				
T.4.1	270	190-158.6	Стандартный	Обмазка нелинейно изменяется на протяжении всего сегмента
T.4.2	180	158.2-155.6	Зубчатое колесо	
T.4.3	270	154.6-127	Стандартный	
T.4.4	270	126.8-161.4	Стандартный	
T.4.5	270	166.2-190	Стандартный	

Нулевой тип геометрии. Предполагает полное отсутствие обмазки внутри (рисунок 2.19, рисунок 2.20).

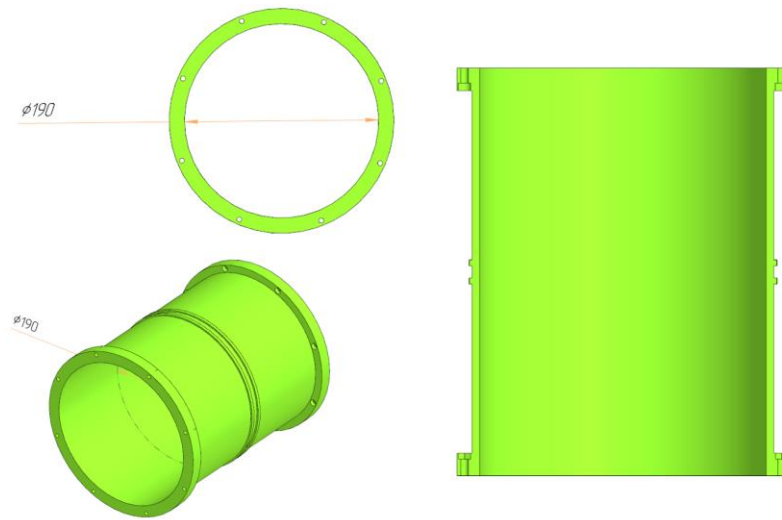


Рисунок 2.19 – Сегмент геометрии нулевого типа (составлено автором)

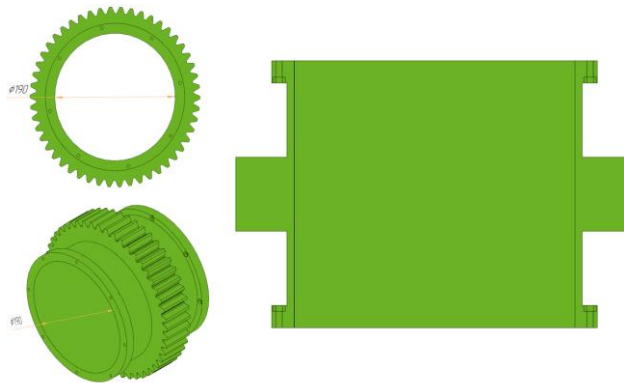


Рисунок 2.20 – Сегмент геометрии нулевого типа с венцевой шестерней (составлено автором)

Первый тип геометрии. Представляет собой приближение, предполагающее одинаковое сужение внутреннего диаметра на всем протяжении сегмента. Реализовано четыре сегмента с различным внутренним диаметром в стандартной форме и в форме зубчатого колеса (рисунок 2.21). Данный тип соответствует рассмотренному в первой главе типу ФРП «Прямой».

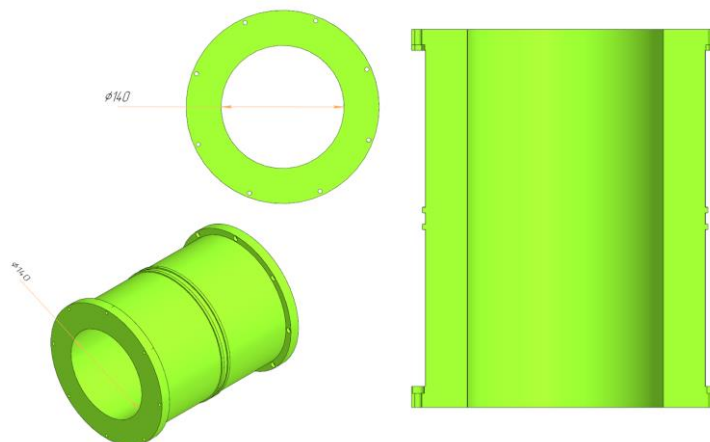


Рисунок 2.21 – Сегмент геометрии первого типа (составлено автором)

Второй тип геометрии. При разработке за основу данного типа взята геометрия трубы из исследования [80]. В частности, воссоздан усеченный конус под номером, который предполагает 45% перекрытие внутреннего диаметра на 66% от начала трубы.

Для реализации усеченного конуса было создано 4 стандартных сегмента и 1 сегмент с зубчатым колесом с сужающимися внутренними стенками под углом 2.06 градуса. При этом усеченный конус заканчивается на 198 мм сегмента Т.2.5 (рисунок 2.22, рисунок 2.23).

Данный тип соответствует рассмотренному в первой главе типу ФРП «Сужающийся».

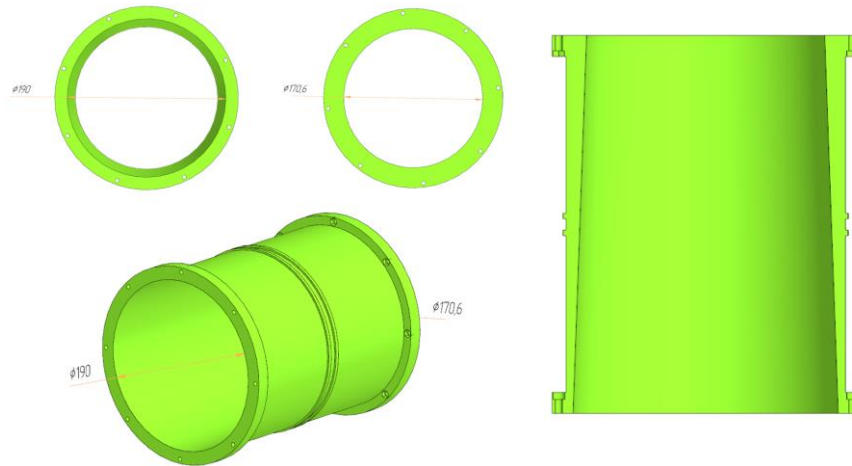


Рисунок 2.22 – Сегмент геометрии второго типа (составлено автором)

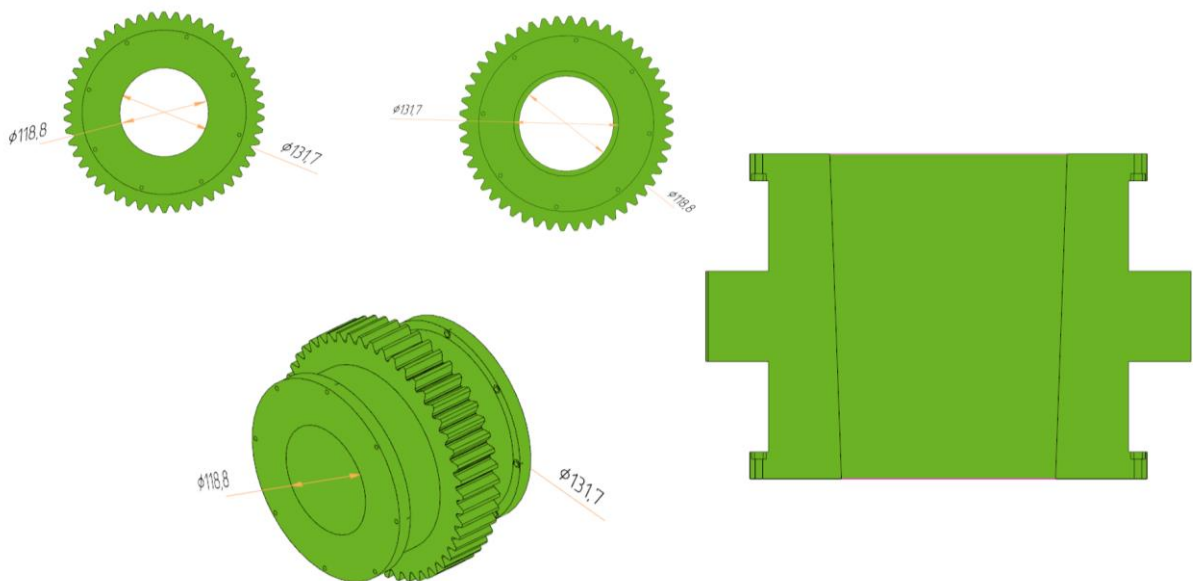


Рисунок 2.23 – Сегмент геометрии второго типа с венцевой шестерней (составлено автором)

Третий тип геометрии. В данную группу отнесены сегменты, имитирующие образование сравнительно узких, но достаточно высоких формирований. В данном типе геометрии варьировалась не только толщина кольца, но и его протяженность (рисунок 2.24).

Данный тип соответствует рассмотренному в первой главе типу ФРП «Кольцо».

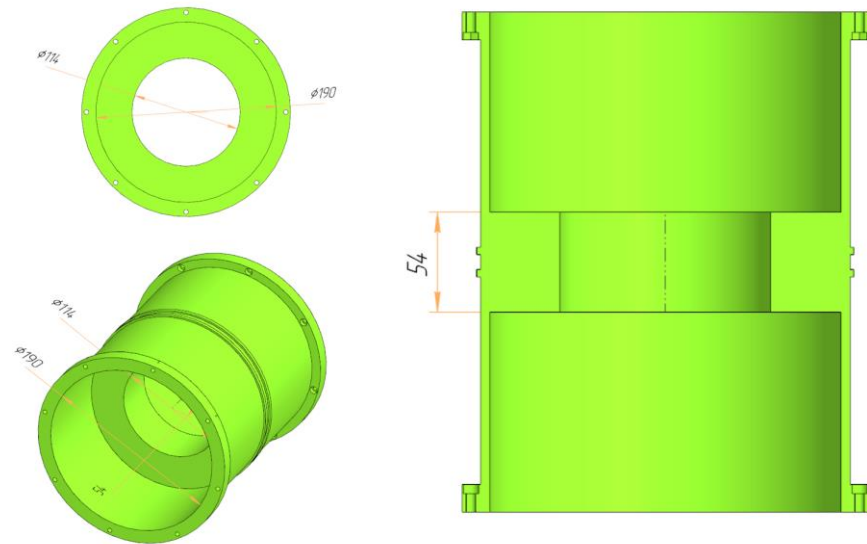


Рисунок 2.24 – Сегмент геометрии третьего типа (составлено автором)

Четвертый тип геометрии. Четвертый и последний тип геометрии призван отобразить наиболее реалистичный профиль геометрии обмазки в реальной печи. Поэтому используется график из работы [126], рассмотренный в первой главе. График был оцифрован и перенесен в масштабе с шагом в 5 мм в 3D-модель сегмента. На рисунках 2.25-2.27 представлены два сегмента и график с учетом масштаба физической модели.

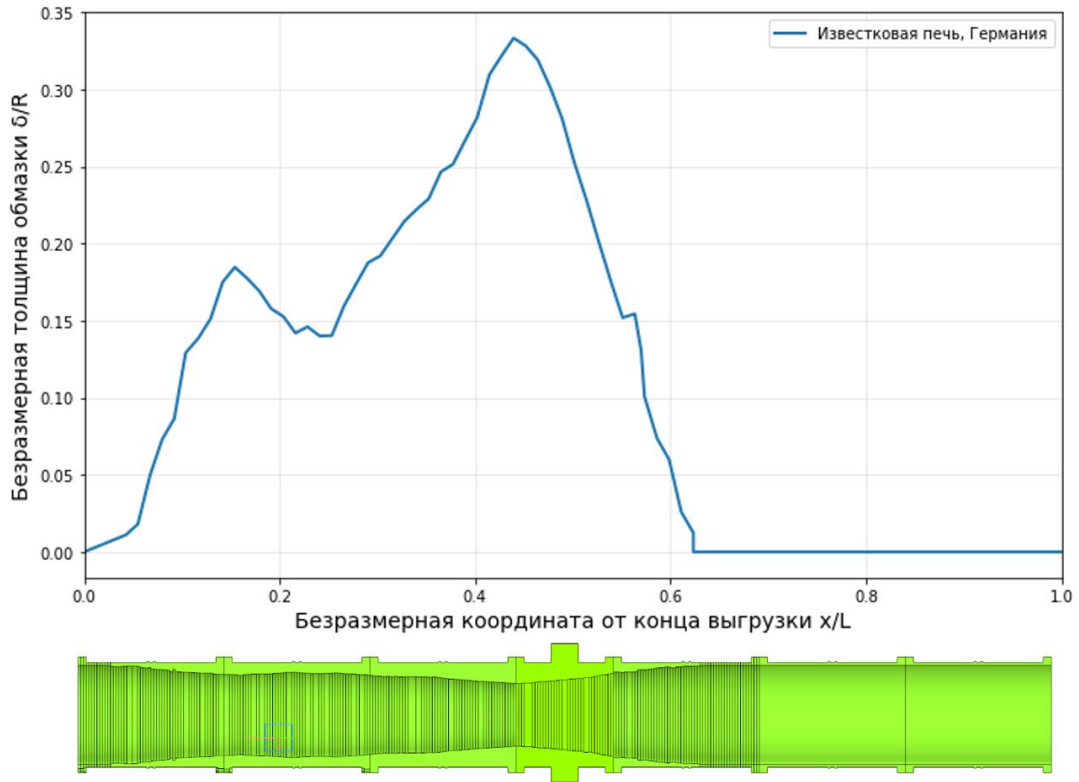


Рисунок 2.25 – Барабан с реалистичным типом ФРП (Б.11) (составлено автором)

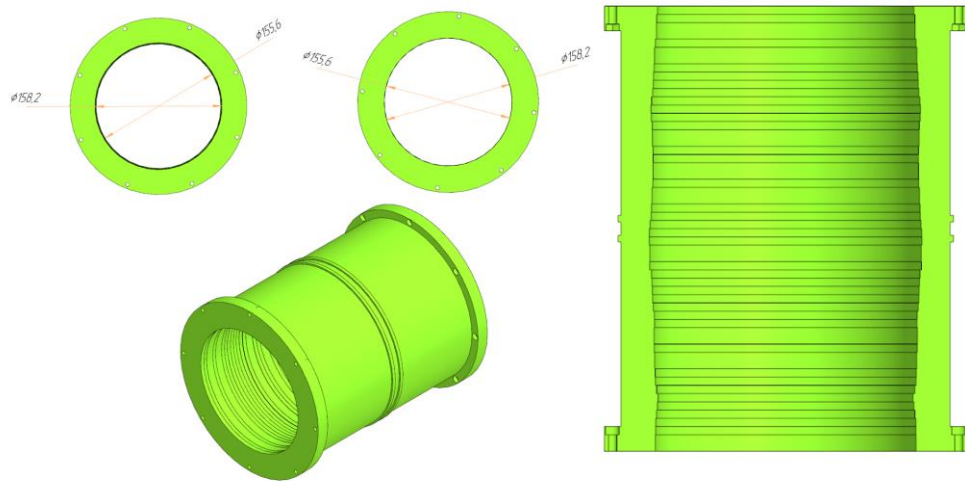


Рисунок 2.26 – Сегмент геометрии четвертого типа (составлено автором)

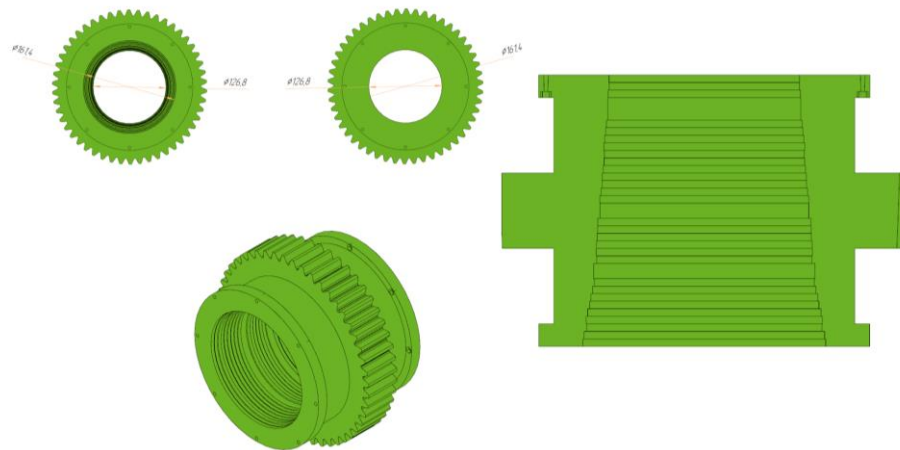


Рисунок 2.27 – Сегмент геометрии четвертого типа с вращающейся шестерней (составлено автором)

Из рассмотренных в таблице 2.1 сегментов были собраны барабаны. Далее при описании результатов будут использоваться специальные обозначения барабанов – Б.х, где буква Б обозначает, что речь идет о барабанах, описанных в таблице 2.2, а х – порядковый номер барабана в таблице. Данное сокращение используется для облегчения чтения результатов работы (рисунок 2.28).

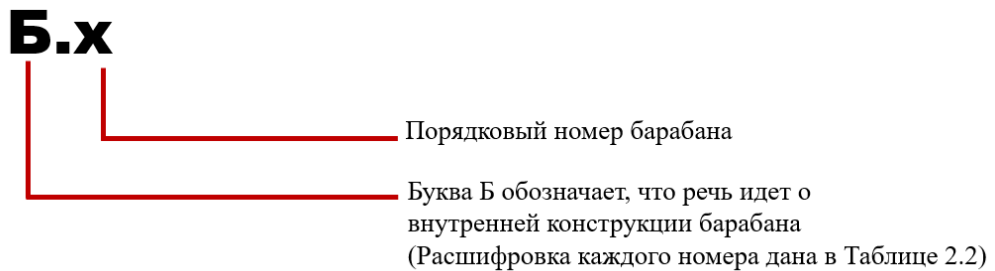


Рисунок 2.28 – Обозначение барабанов (составлено автором)

Таблица 2.2 – Конструкция барабанов (по данным автора)

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.3.5	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

2.2.6 Характеристики использованных материалов и параметры эксперимента

В качестве сыпучего материала был выбран колотый горох, характеризующийся следующими параметрами (таблица 2.3).

Таблица 2.3 – Параметры сыпучего материала (по данным автора)

Параметр	Значение
Динамический угол естественного откоса	24.3°
Статический угол естественного откоса	12.1°
Насыпная плотность	1074 кг/м ³
Размер частиц	1-4 мм

По результатам анализа поперечного движения на разработанной лабораторной установке были определены следующие параметры (таблица 2.4), которые позволяют поддерживать режим движения rolling.

Таблица 2.4 – Параметры эксперимента (по данным автора)

Параметр	Значение
Угол наклона барабана	1°
Скорость вращения барабана	40 об/мин
Степень заполнения в зоне загрузки	12.4%
Расход материала	12.36 кг/ч

В процессе проведения опытов изменялась только форма внутреннего рабочего пространства согласно таблице 2.2, параметры эксперимента и свойства сыпучего материала оставались неизменными.

2.3 Математическое описание

Для описания результатов эксперимента необходимо разработать математическую модель, которая будет учитывать изменение ФРП печи. Наиболее полной моделью, описывающей параметры осевого движения является модель предложенная Ходоровым [64]. Данная модель уже кратко рассматривалась в первой главе данной работы. Как было отмечено ранее существующие математические модели не учитывают изменение ФРП из-за образования

колец и обмазки. В данной работе предлагается решение данной проблемы на основе введения в математическую модель Ходорова [64] дополнительного коэффициента, зависящего от параметров обмазки. Ниже рассмотрен реализованный программный алгоритм расчета модели (рисунок 2.29).

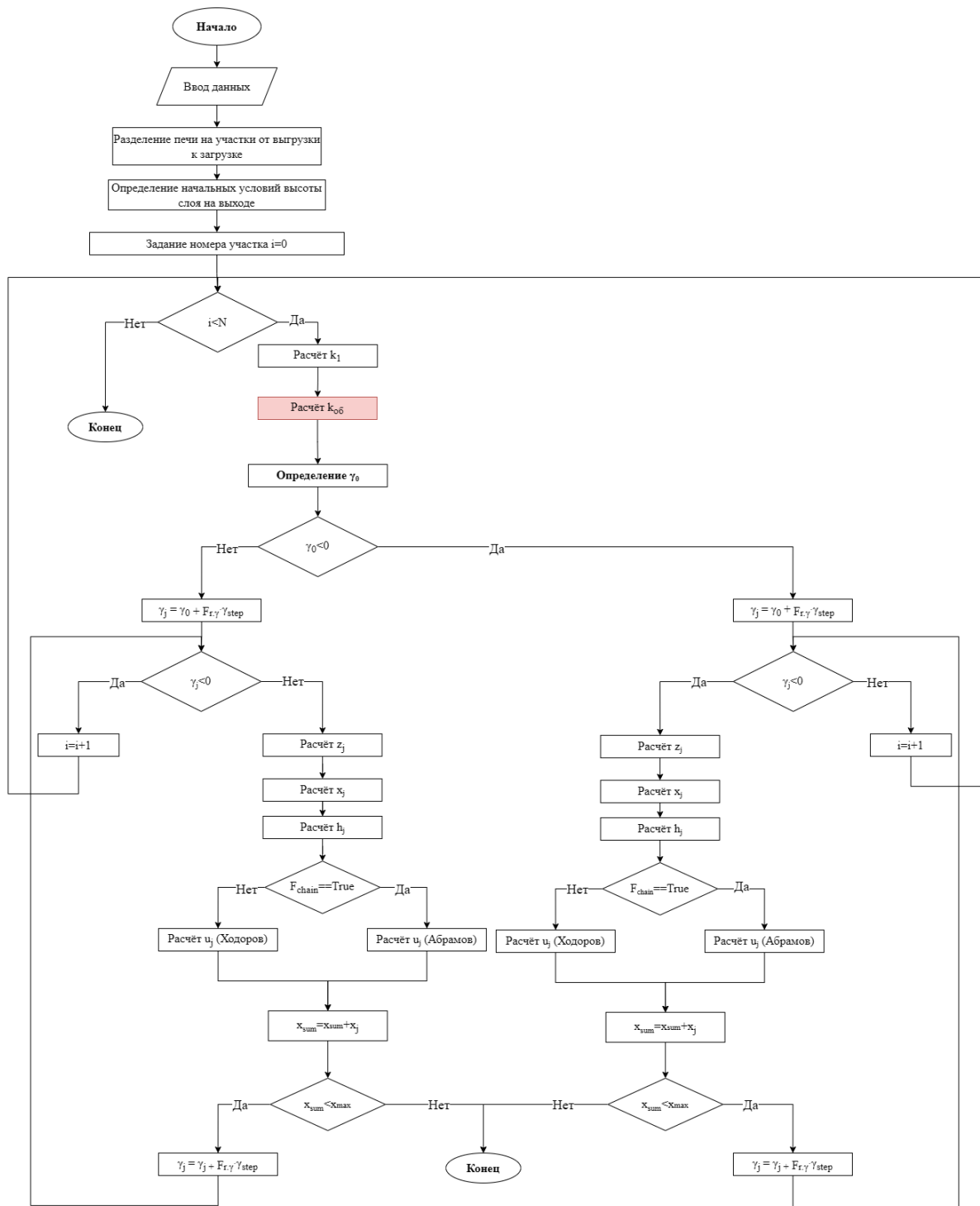


Рисунок 2.29 – Алгоритм расчета математической модели осевого движения материала в ТВП (составлено автором)

Так как данная модель далее будет использована как составная часть прогнозной модели процесса и фигурирует в расчетах третьей главы, чтобы избежать дублирования в данном разделе

будут приведен алгоритм расчета, формулы и значения входных параметров для физической модели из рассматриваемого эксперимента, а значения входных параметров для реальной нефелиновой печи будут рассмотрены в третьей главе данной работы.

Шаг 1 – Ввод данных

Входные параметры математической модели разделены на две группы: параметры, которые будут заданы для каждого участка и параметры общие для модели.

Общие параметры для физической модели будут включать и свойства материала, так как над материалом не производится термическая обработка, следовательно, он не изменяет своих свойств по мере движения. В качестве высоты подпорного кольца принимается половина радиуса частицы согласно методологии, рассмотренной в первой главе. Геометрические параметры для участков в физической модели задавались согласно таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Общие параметры модели для физической модели (по данным автора)

Обозначение	Описание	Значение	Единицы измерения
$G_{\text{спек}}$	Производительность печи по спеку	12.36	кг/ч
n	Скорость вращения печи	40	об/мин
h_0	Высота подпорного кольца	0.00163	м
α	Угол наклона печи к горизонту	1	град
β	Динамический угол естественного откоса	24.3	град
φ	Статический угол естественного откоса	12.1	град
ρ_{bulk}	Насыпная плотность	1074.3	кг/м ³
G_M	Расход материала	1	кг/кг спека

Шаг 2 – Разделение печи на участки от выгрузки к загрузке

Печь разбивается на участки в зависимости от конструкции печи и ожидаемого изменения свойств материала. Подробнее данный момент освещен в третьей главе.

Шаг 3 – Определение начальных условий высоты слоя на выходе

Для начала расчёта необходимо задать высоту слоя в точке выгрузки материала. В случае если печь оборудована подпорным кольцом, то высота слоя будет равна толщине кольца, если же кольца нет, то значение принимается равным половине диаметра частицы.

Шаг 4 – Задание номера нулевого участка

Участки пронумерованы в порядке их расположения на координатной оси от загрузки к выгрузке, однако их расчет выполняется в противоположном направлении.

Шаг 5 – Проверка расчета всех участков

5.1 Проверяем условие (2.25):

$$i < N \quad (2.5)$$

Если условие не выполняется, то расчёт успешно завершается. Если условие выполняется, то алгоритм переходит к шагу 6.

Шаг 6 – Расчёт k_1

6.1 Выполняется расчет центрального угла на выходе из печи, град (2.6).

$$\varepsilon_0 = 2 \arccos \left(\frac{R-h_0}{R} \right) \quad (2.6)$$

6.2 Рассчитывается k_1 по формуле 1.33

Шаг 7 – Расчёт $k_{об}$

Данный коэффициент предложен в текущей работе и позволяет учесть толщину обмазки в модели (2.7). На участках, где обмазка отсутствует становится равен 1 и соответственно не влияет на расчёт.

$$k_{об} = 1 + 1.1 \left(\frac{s_{об}}{R} \right)^{1.421} \quad (2.7)$$

Шаг 8 – Расчёт объемного расхода материала (2.8)

$$Q_s = \frac{G_{спек} G_M}{3600 \rho_{bulk}} \quad (2.8)$$

Шаг 9 – Расчет начального угла между осью печи и поверхностью материала γ_0

9.1 Расчет начального значения безразмерной функции углов (α, γ, β) z_0 на данном участке (2.9).

$$z_0 = \frac{45 Q_s}{k_1 k_2 k_{об} \pi n \sqrt{(D_{вн} - h_0) h_0}^3} \quad (2.9)$$

1.2 На основе рассчитанного значения z_0 определяется γ_0 из уравнения 1.36-1.38

Шаг 10 – Проверка знака γ_0

10.1 Проверяем условие (2.10):

$$\gamma_0 < 0 \quad (2.10)$$

Данное условие необходимо для контроля того, что γ внутри одной секции не меняет знак. На данном этапе определяется начальный знак γ .

Если условие не выполняется, то расчёт переходит к шагу 11. Если условие выполняется, то алгоритм переходит к шагу 22.

Шаг 11 – Рассчитывается γ для следующего j -го шага внутри сегмента (2.11):

$$\gamma_j = \gamma_0 + F_{r,\gamma} \gamma_{step} \quad (2.11)$$

Шаг 12 – Проверка знака γ_j

12.1 Проверяем условие (2.12):

$$\gamma_j < 0 \quad (2.12)$$

Данное условие необходимо для контроля того, что γ внутри одной секции не меняет знак. На данном этапе определяется изменился ли знак γ после первого шага внутри сегмента.

Если условие не выполняется, то расчёт переходит к шагу 13. Если условие выполняется, то расчет данного участка завершается, к счетчику i добавляется единица, а алгоритм возвращается к шагу 5.

Шаг 13 – Расчет значения безразмерной функции углов (α, γ, β) z_j

Расчет производится по уравнениям 1.36-1.38.

Шаг 14 – Расчет осевого шага x_j , который соответствует шагу изменения γ_j (2.13)

$$\left(2R_0 \pm (x_1 + x_2 + \dots + x_j)tg(\gamma) - h_0 \pm x_1tg(\gamma_1) \pm x_1tg(\gamma_2) \pm \dots \pm x_jtg(\gamma_j)\right) \cdot \left(h_1 \pm (x_1 + x_2 + \dots + x_j)tg(\gamma) \mp x_1tg(\gamma_1) \mp x_2tg(\gamma_2) \mp \dots \mp x_jtg(\gamma_j)\right) = \sqrt[3]{\left(\frac{45Q_s}{k_1k_2k_0\pi n z_j}\right)^2} \quad (2.13)$$

Шаг 15 – Расчёт высоты на данном осевом шаге h_j (2.14)

$$h_j = h_0 \pm x_1tg(\gamma_1) \pm \dots \pm x_jtg(\gamma_j) \quad (2.14)$$

Шаг 16 – Проверка флага цепной зоны

16.1 Проверяем условие (2.15):

$$F_{chain} == True \quad (2.15)$$

Если условие не выполняется, то расчёт переходит к шагу 17. Если условие выполняется, то алгоритм переходит к шагу 18.

Шаг 17 – Расчет осевой скорости движения материала по уравнению Ходорова

Расчет производится по уравнению 1.56

Расчет переходит к шагу 19.

Шаг 18 – Расчет осевой скорости движения материала по уравнению Абрамова

Расчет производится по уравнению 1.59

Шаг 19 – Расчет текущей координаты по оси печи (2.16)

$$x_{sum} = x_{sum} + x_j \quad (2.16)$$

Шаг 20 – Проверка что печь ещё полностью не рассчитана

20.1 Проверяем условие (2.17):

$$x_{sum} < x_{max} \quad (2.17)$$

Если условие не выполняется, то расчёт успешно завершается. Если условие выполняется, то алгоритм переходит к шагу 21.

Шаг 21 – Рассчитывается γ для следующего j -го шага внутри сегмента (2.18)

$$\gamma_j = \gamma_j + F_{r,\gamma} \gamma_{step} \quad (2.18)$$

Алгоритм возвращается к шагу 12.

Шаг 22 – Рассчитывается γ для следующего j -го шага внутри сегмента

Аналогично шагу 11

Шаг 23 – Проверка знака γ_j

23.1 Проверяем условие (2.19):

$$\gamma_j < 0 \quad (2.12)$$

Данное условие необходимо для контроля того, что γ внутри одной секции не меняет знак. На данном этапе определяется изменился ли знак γ после первого шага внутри сегмента.

Если условие выполняется, то расчёт переходит к шагу 24. Если условие не выполняется, то расчет данного участка завершается, к счетчику i добавляется единица, а алгоритм возвращается к шагу 5.

Шаги 24 – 31 полностью аналогичны шагам 13 – 20.

Шаг 32 – Рассчитывается γ для следующего j -го шага внутри сегмента (2.18)

$$\gamma_j = \gamma_j + Fr_\gamma \gamma_{step} \quad (2.18)$$

Алгоритм возвращается к шагу 23.

2.4 Результаты

Согласно методологии, изложенной в пункте 2.2, было проведено 11 экспериментов на физической модели с различными типами ФРП. После чего была предложена модификация для модели Ходорова Е.И. [64], предполагающую введение нового коэффициента $k_{об}$, который рассчитывается по формуле 2.7. В данном разделе предельно представлены результаты экспериментов, высота слоя в которых приведена к степени заполнения, а также проводится сравнение модифицированной версии модели, предложенной в данной работе, и оригинальной моделью.

2.4.1 Высота слоя материала

Барабан Б.0 не имеет изменений ФРП, а коэффициент $k_{об}$ в предлагаемой модели в случае отсутствия обмазки будет равен 1, поэтому модифицированная и оригинальная модель покажут абсолютно одинаковые результаты при расчете барабана без обмазки (рисунок 2.30).

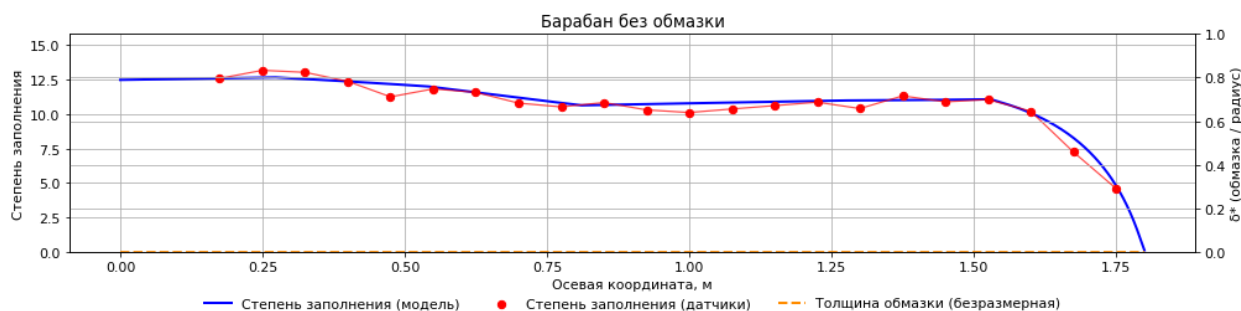


Рисунок 2.30 – Сравнение результатов эксперимента барабана Б.0 с математической моделью (составлено автором)

Значение коэффициента детерминации $R^2 = 0.94$ показывает, что разработанная модель адекватно описывает распределение степени заполнения по длине. Форма полученного профиля согласуется с экспериментальными исследованиями в работе [64], несмотря на отличную скорость вращения, что косвенно подтверждает справедливость сделанных ранее утверждений о критериях подобия.

Рассмотрим барабаны с типом обмазки «Прямая» (рисунки 2.31–2.34). По максимальной погрешности и значению R^2 можно отметить, что оригинальная модель Ходорова Е.И. также достаточно точно описывает данный тип геометрии.

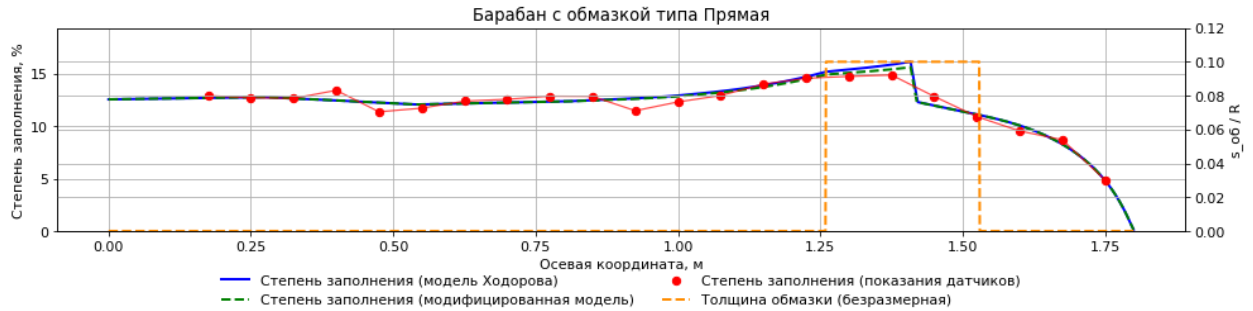


Рисунок 2.31 – Сравнение результатов эксперимента барабана Б.1 с математической моделью (составлено автором)

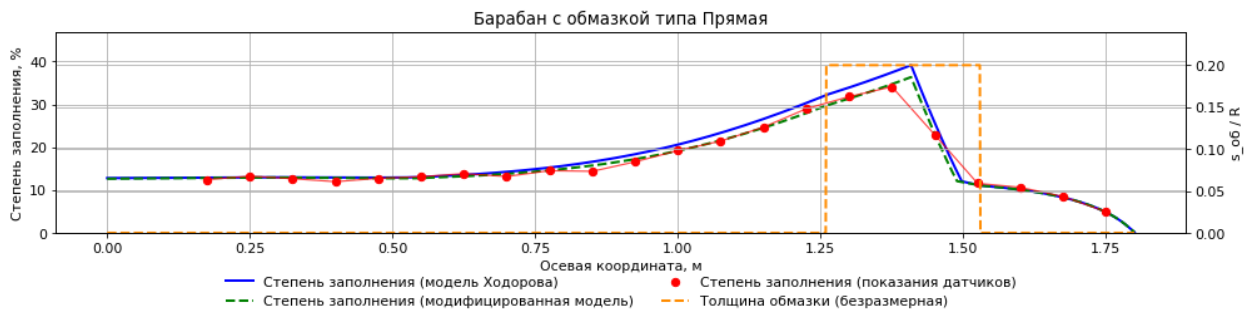


Рисунок 2.32 – Сравнение результатов эксперимента барабана Б.2 с математической моделью (составлено автором)

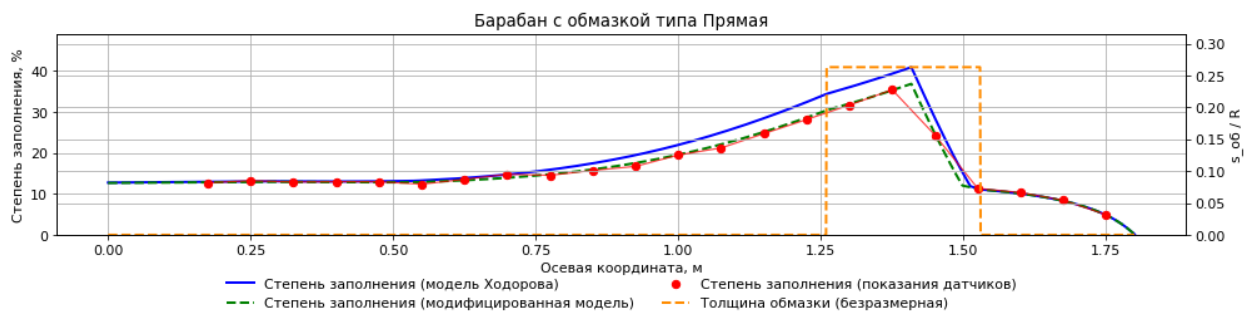


Рисунок 2.33 – Сравнение результатов эксперимента барабана Б.3 с математической моделью (составлено автором)

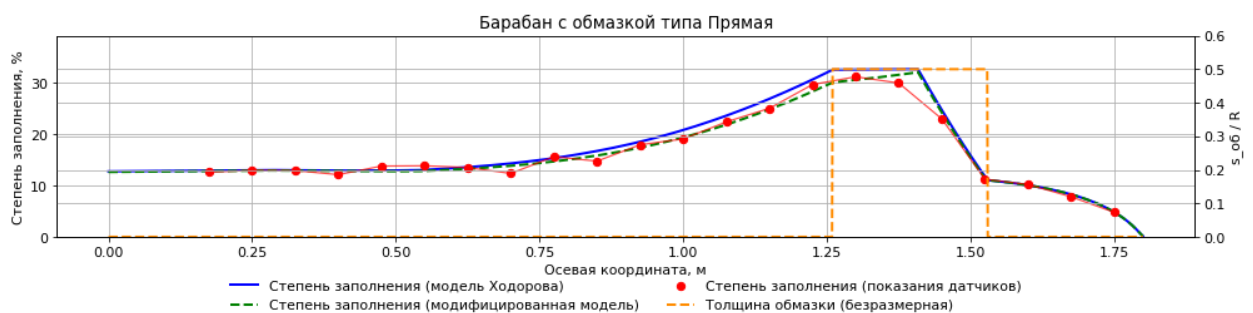


Рисунок 2.34 – Сравнение результатов эксперимента барабана Б.4 с математической моделью (составлено автором)

Рассмотрим барабан с типом обмазки «Сужение» (рисунок 2.35). В сравнении с профилями барабана с типом обмазки «Прямая» можно отметить, что чем толще становится обмазка, тем больше показания моделей начинают расходиться. Постепенное сужение показало, что данный тип геометрии описывается моделями хуже, чем прямая. Результаты экспериментов с типом «Кольцо» и «Реалистичная» представлены на рисунках 2.35-2.39 и 2.40.

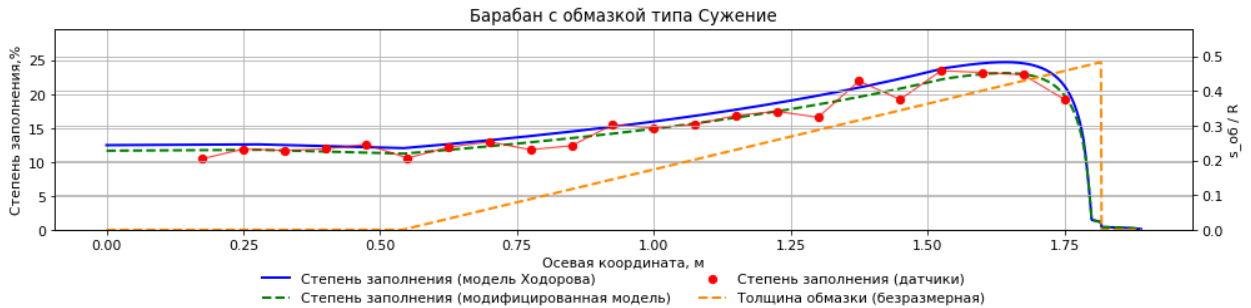


Рисунок 2.35 – Сравнение результатов эксперимента барабана Б.5 с математической моделью (составлено автором)

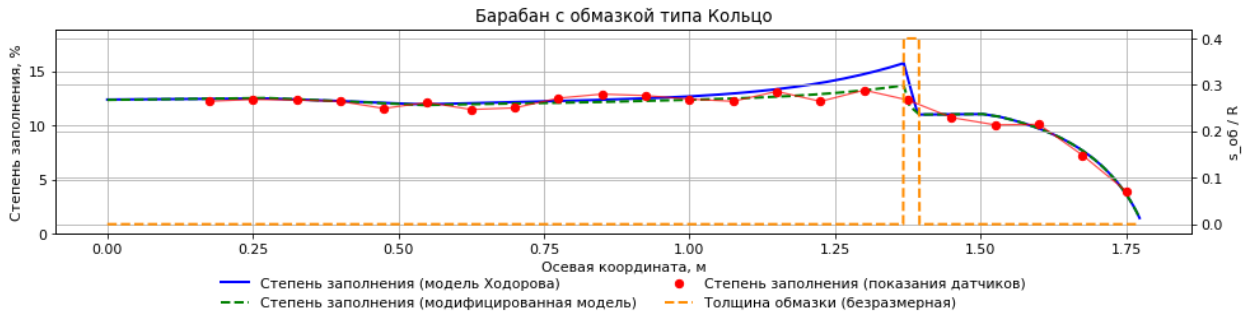


Рисунок 2.36 – Сравнение результатов эксперимента барабана Б.6 с математической моделью (составлено автором)

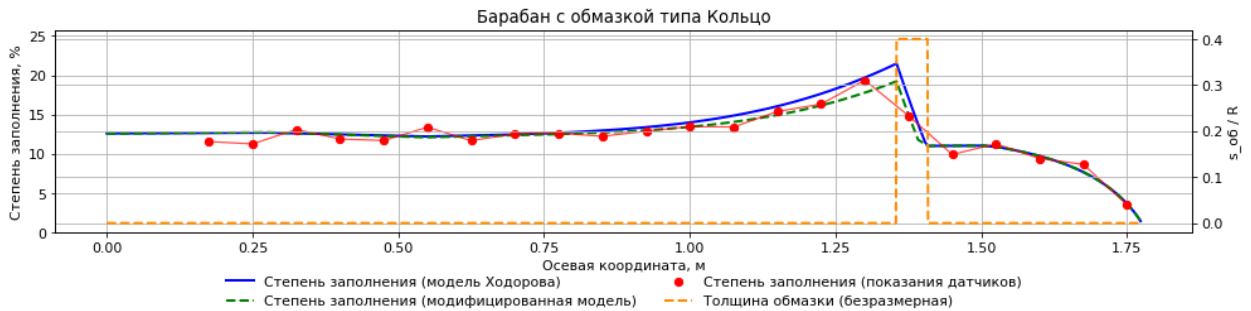


Рисунок 2.37 – Сравнение результатов эксперимента барабана Б.7 с математической моделью (составлено автором)

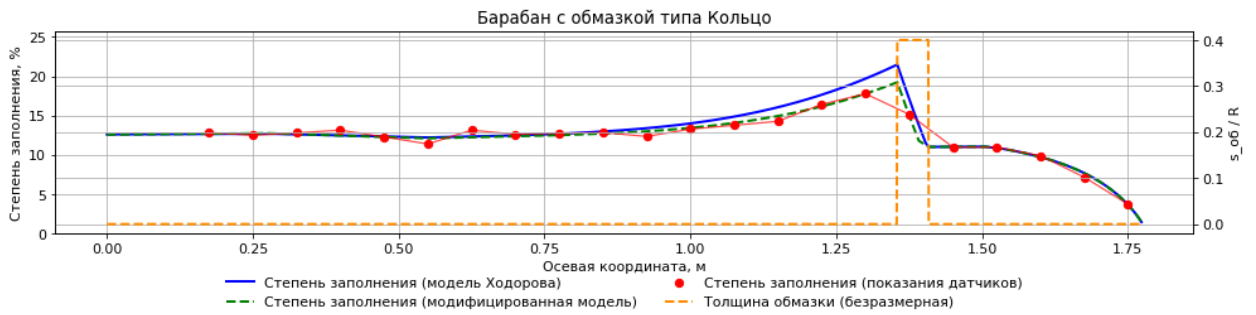


Рисунок 2.38 – Сравнение результатов эксперимента барабана Б.8 с математической моделью
(составлено автором)

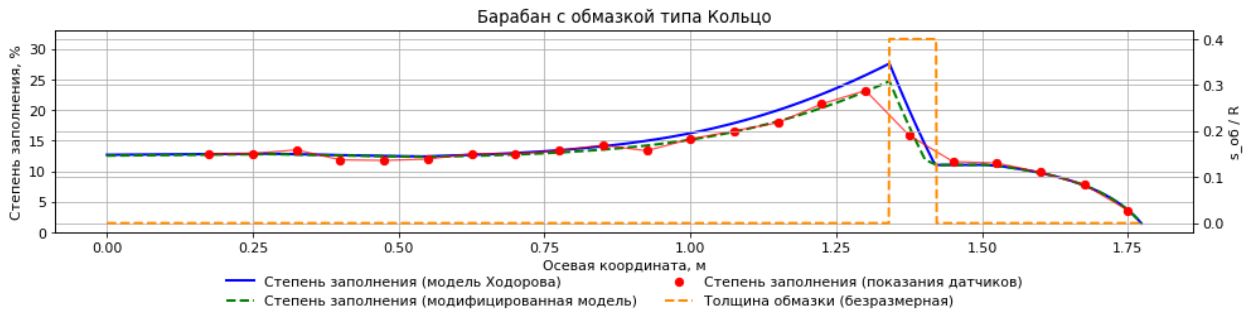


Рисунок 2.39 – Сравнение результатов эксперимента барабана Б.9 с математической моделью
(составлено автором)

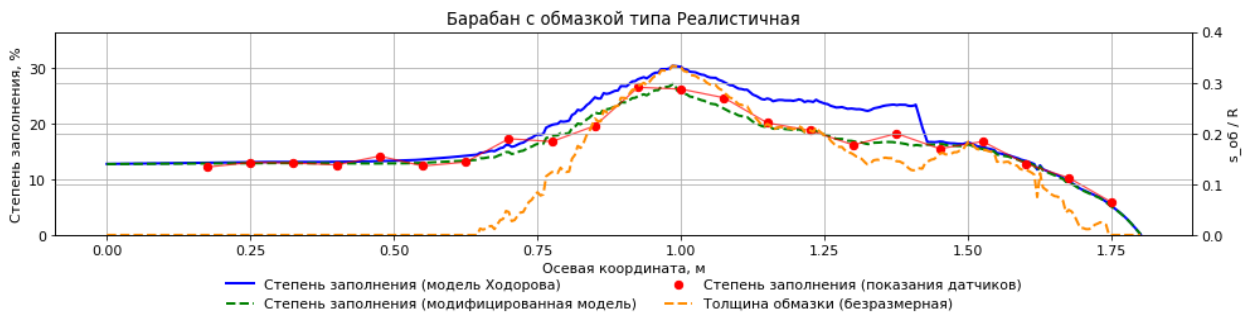


Рисунок 2.40 – Сравнение результатов эксперимента барабана Б.10 с математической моделью
(составлено автором)

По результатам серии из 11 вычислительных экспериментов установлено, что предложенная модификация модели Ходорова Е.И. обеспечивает более точное описание распределения степени заполнения материала по длине барабана при наличии обмазки различной формы. Для барабана без обмазки результаты исходной и модифицированной моделей полностью совпадают, поскольку коэффициент влияния обмазки равен единице. Это подтверждает, что введенная модификация не искажает расчет при отсутствии изменения внутренней геометрии барабана (таблица 2.6).

Таблица 2.6 – Сравнение результатов экспериментов по определению высоты слоя с различными барабанами и математической моделью (по данным автора)

№ Б	Модифицированная модель err_{max}	Модифицированная модель R^2	Ходоров err_{max}	Ходоров R^2
Б.0	7.12%	0.94	7.12%	0.94
Б.1	9.88%	0.94	10.31%	0.93
Б.2	9.42%	0.98	15.52%	0.96
Б.3	5.87%	0.98	17.66%	0.91
Б.4	12.09%	0.98	15.87%	0.97
Б.5	12.26%	0.94	19.95%	0.86
Б.6	8.28%	0.96	16.18%	0.87
Б.7	13.23%	0.93	15.22%	0.9
Б.8	7.24%	0.98	12,88%	0.89
Б.9	9.19%	0.98	26.08%	0.89
Б.10	14%	0.93	46.32%	0.7

Сравнение по коэффициенту детерминации показывает, что модифицированная модель во всех рассмотренных случаях сохраняет высокую точность аппроксимации экспериментальных данных (таблица 2.6). Значения R^2 для предложенной модели находятся в диапазоне от 0.93 до 0.98, что свидетельствует о хорошем соответствии расчетных и экспериментальных профилей степени заполнения. Для исходной модели Ходорова значения R^2 изменяются в более широких пределах от 0.70 до 0.97, что указывает на ухудшение описания процесса при усложнении внутренней геометрии барабана.

По максимальной погрешности также видно преимущество предложенной модели. Для большинства экспериментов ошибка модифицированной модели ниже, чем у исходной модели Ходорова. Особенно выраженное улучшение получено для барабана Б.10, где максимальная погрешность исходной модели составляет 46.32 %, тогда как для модифицированной модели погрешность составила 14 %. Аналогично, для барабана Б.9 погрешность снижена с 26.08 % до 9.19 %, а для барабана Б.5 с 19.95 % до 12.26 %.

2.4.2 Среднее время пребывания

В таблице 2.7 приведено сравнение экспериментальных значений среднего времени пребывания материала в барабане с результатами расчета по модифицированной модели. В качестве критерия точности использована относительная погрешность между экспериментальными и расчетными значениями MRT.

Анализ данных показывает, что модифицированная модель достаточно точно воспроизводит время пребывания материала для всех рассмотренных типов барабанов. Значения погрешности находятся в диапазоне от 3.4 до 11.8 %, при этом средняя погрешность по всем экспериментам составляет около 7.2 %. Это свидетельствует о хорошем соответствии расчетных данных экспериментальным результатам.

Таблица 2.7 – Сравнение результатов экспериментов по определению среднего времени пребывания MRT с различными барабанами и математической моделью (по данным автора)

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

2.5 Выводы по главе 2

По результатам экспериментов, выполненных на разработанной физической модели объекта, установлено, что предложенная математическая модель во всех рассмотренных случаях обеспечивает более точное описание экспериментальных данных по сравнению с исходной моделью. При этом по мере усложнения формы рабочего пространства барабана, вплоть до геометрии типа «Реалистичная», различия между результатами модифицированной и оригинальной моделей становятся более выраженными. Это подтверждает, что учет изменения внутренней геометрии агрегата является необходимым условием для корректного описания движения сыпучего материала.

Полученные результаты позволяют подтвердить положение о том, что разработанная математическая модель осевого движения сыпучего материала во вращающемся цилиндрическом агрегате с изменяющейся внутренней формой рабочего пространства может быть использована для косвенного определения параметров, которые затруднительно измерять непосредственно в промышленной печи. К таким параметрам относятся среднее время пребывания материала в агрегате и высота слоя материала по длине печи.

Сравнение расчетных и экспериментальных значений среднего времени пребывания показало, что максимальная относительная погрешность модифицированной модели составляет 11.8. Кроме того, результаты расчета распределения степени заполнения и высоты слоя материала по длине барабана согласуются с экспериментальными данными с погрешностью не более 14 %.

Таким образом, предложенная математическая модель позволяет с приемлемой точностью определять неизмеряемые параметры движения сыпучего материала во вращающемся цилиндрическом агрегате с учетом изменения внутренней геометрии. Полученные результаты

подтверждают возможность применения модели как расчетного блока для анализа работы трубчатой вращающейся печи и последующего использования в составе комплексной математической модели процесса. Положение считается доказанным.

Результаты данной главы использованы в деятельности компании АО «Моделирование и Цифровые двойники» при моделировании движения материала в ТВП, а также при оптимизации параметров процесса спекания (акт о внедрении от 01.04.2026 представлен в приложении В).

ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОЙ ПРОГНОЗНОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА СПЕКАНИЯ НЕФЕЛИНОВОГО КОНЦЕНТРАТА С ИЗВЕСТНЯКОМ В ТВП

3.1 Структура комплексной прогнозной модели

В данной главе рассмотрена предлагаемая структура и алгоритм расчета комплексной прогнозной модели для спекания нефелинового концентрата с известняком.

В основе модели лежит зональный подход описанный в работе [58], применяющийся для печей цементной промышленности. В основе данного метода лежит разделение печи по оси на произвольное количество участков, определяемое на основе знаний о протекании процесса. При разделении печи на участки принимаются во внимание состав материала, газа и температура материала [58]. Часто встречающимся решением является выделение цепной зоны в качестве одного отдельного участка, так как изменение температуры в нем практически линейно, а уравнения для движения и газа и материала будут отличаться от зон без теплообменных устройств [1; 58].

Однако в предлагаемом решении в подход были внесены изменения. Во-первых, важным отличием является возврат пыли. Так как подход описанный в работе [58] применялся для цементных печей, в которых пыль в абсолютном большинстве случаев возвращается в холодный конец печи, уравнения определяющие концентрацию пыли в воздухе и её унос учитывали только унос пыли, но не учитывали оседание и точку возврата пыли на основе статистической информации представленной в литературе [5]. Так как возврат пыли в факел для нефелиновых ТВП является одним из основных управляющих параметров также были скорректированы формулы расчета степени черноты запыленного газа в данной области на основе представленных в литературе зависимостей для нефелиновых печей [14]. В данной же работе был предложен алгоритм, позволяющий учесть возврат пыли в конкретную точку печи, адаптированный для расчета зонального метода на ЭВМ с произвольным количеством выделяемых зон. Также в алгоритм зонального расчета была интегрирована модифицированная модель Ходорова Е. И., описанная во второй главе данной работы, поэтому при разделении на зоны учитывалось также изменение свойств материала в результате химико-физических превращений: изменение углов статического и динамического откоса, насыпной плотности и конструкция печи. Кроме того, в зональный метод была интегрирована модель химических превращений [36], которая предполагает движение «малой» порции материала вдоль оси печи, исключая участок цепной зоны, и связывает время продвижения материала с осевой координатой за счет осевой скорости движения материала в каждой конкретной области.

Следует рассмотреть структуру (рисунок 3.1) и упрощенный алгоритм расчета (рисунок 3.2) предлагаемой комплексной прогнозной модели ТВП.

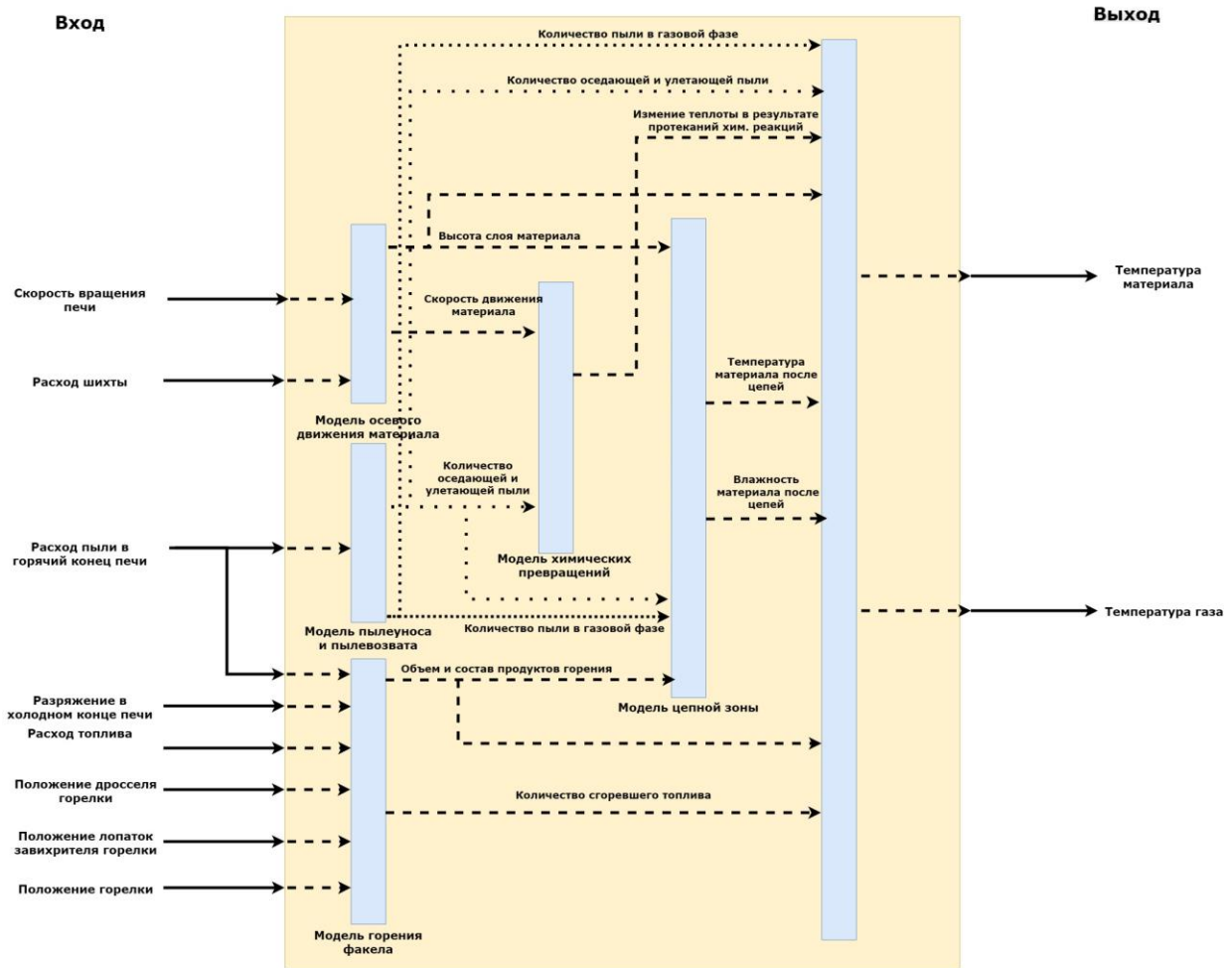


Рисунок 3.1 – Структура комплексной прогнозной модели (составлено автором)

Комплексная модель состоит из нескольких моделей (рисунок 3.1):

- осевого движения материала,
- модель горения факела,
- модель пылеуноса и пылевозврата,
- модель химических превращений,
- модель цепной зоны,
- модель теплообмена в зонах без теплообменных устройств.

Модель осевого движения ранее уже была рассмотрена во второй главе, поэтому будет лишь кратко рассмотрена в данной главе с рассмотрением входных данных для моделирования реальной нефелиновой печи. Её выходными параметрами является профиль высоты слоя материала и скорость движения материала [51; 52]. Высота слоя материала является необходимым параметром для расчета теплообмена как в зоне цепей, так и в зонах без теплообменных устройств. Значение данного параметра позволяет определить как часть поперечного сечения печи занята материалом, а какая газовой фазой, что соответственно будет влиять на все теплообменные процессы во внутреннем пространстве печи. Модель пылеуноса и пылевозврата рассчитывает два зональных профиля: количество пыли в газовой фазе и количество

изменения материала в результате оседания или уноса пыли. Изменение данных параметров влияет на расчет теплообмена в зоне цепей и зонах без теплообменных устройств так как вносит дополнительный тепловой поток, а также меняет состав материала так как уже было рассмотрено в первой главе состав пыли отличается от состава материала. Соответственно по этой же причине пыль необходимо учитывать и в модели химических превращений. Так как вся пыль подается в зону факела, расход пыли будет фигурировать в нем, но модель пылеуноса напрямую не связана с моделью факела. Модель горения факела позволяет объем и состав продуктов горения, из которых преимущественно и состоит газовая фаза, поэтому они напрямую участвуют при расчете теплообмена во всех зонах печи. Кроме того, главным результатом расчета модели факела является определение профиля несгоревшего топлива по длине печи. Данный профиль с помощью осевой координаты сопоставляется с зональным разделением и соответственно определяется количество топлива, сгоревшего в данной зоне, и используется при расчете теплообмена. Модель теплообмена в цепной зоне позволяет определить температуру газа на входе в зону, температуру материала на выходе из зоны, а также остаточную влажность материала. При этом следует учесть, что использование данной схемы расчета предполагается, что если температура материала на выходе из цепной зоны равна или превышает $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, то влажность принимается равной нулю, а если влажность не нулевая, то принимается, что на следующем выделенном участке испаряется вся остаточная влага. Таким образом, выходные данные из модели цепной зоны становятся входными данными для расчета теплообмена во всех прочих зонах печи. Модель химических превращений позволяет рассчитать реакцию декарбонизации (1.5) и реакции спекания (1.6, 1.7) и определить состав материала в размерности кг/кг. спека. В результате протекания химических реакций происходит изменение теплоты, а также меняется состав материала, что учитывается в модели теплообмена. Результатом расчета модели теплообмена являются температурные профили газа и материала по длине печи.

Входные данные, начальные приближения и допущения каждой из моделей будут рассмотрены в соответствующих разделах данной главы.

Обращаясь к алгоритму (рисунок 3.2) следует отметить, что с учетом взаимосвязей между моделями удалось рассчитывать многие модели параллельно, что ускорило расчет всей комплексной модели. Первыми рассчитываются модели пылеуноса и пылевозарата, осевого движения и горения факела, так как их расчет не требует в качестве входных данных результатов расчета других моделей. На втором этапе рассчитываются модель цепной зоны и модель химических превращений, так как они затрагивают разные участки печи. И на завершающем этапе рассчитывается модель теплообмена, так как для её расчета необходимы значения выходных параметров всех остальных моделей.

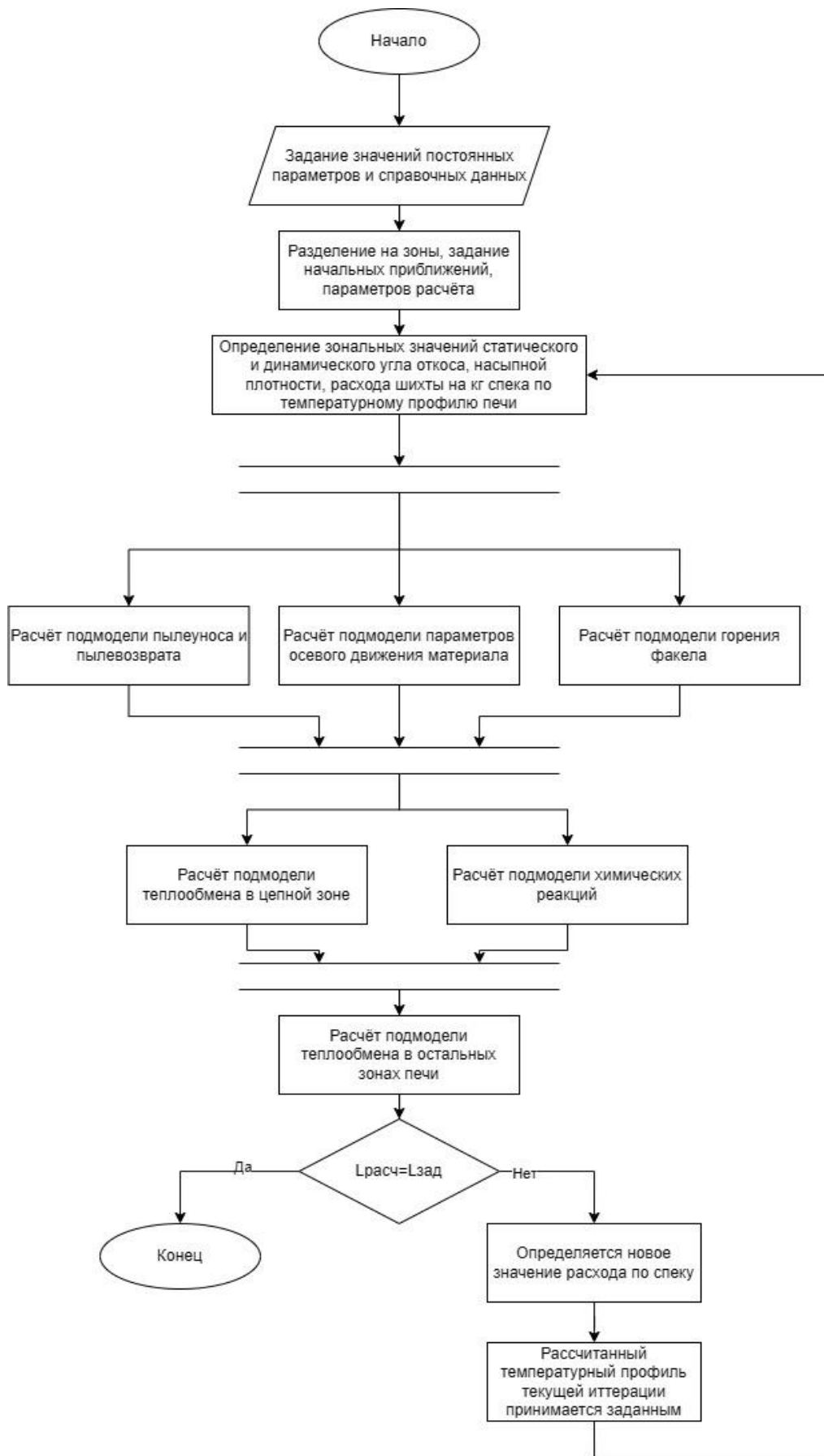


Рисунок 3.2 – Краткий алгоритм расчета комплексной прогнозной модели (составлено автором)

После расчета всех моделей выполняется проверка совпадения расчетной и известной длины печи. Если они совпадают, значит расчет успешно завершается, в противном случае рассчитанные значения температуры принимаются как значения для следующей итерации, а производительность печи корректируется.

Теперь следует подробно рассмотреть каждую из представленных моделей.

3.2 Модель осевого движения материала в ТВП

Во второй главе уже подробно рассмотрены алгоритм расчета, формулы и входные параметры для физической модели. В этом же подразделе будут рассмотрены входные параметры для моделирования реального нефелиновой печи, а также результаты расчета.

Так как данная модель далее будет использована как составная часть прогнозной модели процесса и фигурирует в расчетах третьей главы, чтобы избежать дублирования в данном разделе будут приведены значения входных параметров для двух случаев расчета: физической модели из рассматриваемого эксперимента и реальной нефелиновой печи.

Входные параметры математической модели разделены на две группы: параметры, которые будут заданы для каждого участка (таблица 3.2, таблица 3.3) и параметры общие для модели (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Общие параметры модели для расчета реальной печи (составлено автором)

Обозначение	Описание	Значение	Единицы измерения	Источник
$G_{\text{спек}}$	Производительность печи по спеку	38 000	кг/ч	[1]
n	Скорость вращения печи	1.8	об/мин	[1]
h_0	Высота подпорного кольца	0.6	м	[64]
α	Угол наклона печи к горизонту	1.72	град	[64]

Таблица 3.2 – Параметры модели для каждого участка реальной печи (по данным автора)

№	Обозначение	Описание	Значение	Единицы измерения	Источник
Общая информация для участков					
1	β	Динамический угол естественного откоса	Задается по температуре материала (рисунок 3.6)	град	[29]
2	φ	Статический угол естественного откоса	Задается по температуре материала (рисунок 3.4)	град	[29]
3	ρ_{bulk}	Насыпная плотность	Задается по температуре материала (рисунок 3.5)	кг/м ³	[29]

Продолжение Таблицы 3.2

№	Обозначение	Описание	Значение	Единицы измерения	Источник
Общая информация для участков					
4	G_M	Расход материала	Задается по температуре материала (рисунок 3.3)	кг/кг спека	[29]
5	x_{start}	Осевая координата начала участка от точки загрузки	149	м	-
6	x_{end}	Осевая координата конца участка от точки загрузки	150	м	-
Общая информация для участков					
7	$T_{M.in}$	Начальное приближение температуры материала на входе в зону	Выбирается согласно рисунку 1.4 и координате	°C	[29]
8	$T_{M.out}$	Начальное приближение температуры материала на входе в зону	Выбирается согласно рисунку 1.4 и координате	°C	[29]
9	$D_{вн}$	Внутренний диаметр	Выбирается согласно рисунку 1.4 и координате	м	[29]

Таблица 3.3 – Параметры модели для каждого участка реальной печи (по данным автора)

№ Участка	x_{start} м	x_{end} м	$S_{об}$ м	γ_{step} град	$F_{r,\gamma}$	№ Участка	x_{start} м	x_{end} м	$S_{об}$ м	γ_{step} град	$F_{r,\gamma}$
34	149	150	0.1	0.1	-1	17	123	127	0.1	0.1	-1
33	148	149	0.1	0.1	-1	16	119	123	0	0.1	-1
32	147	148	0.1	0.1	-1	15	115	119	0	0.1	-1
31	146	147	0.1	0.1	-1	14	109	115	0	0.1	-1
30	145	146	0.1	0.1	-1	13	105	109	0	0.1	-1
29	144	145	0.1	0.1	-1	12	101	105	0	0.1	-1
28	143	144	0.1	0.1	-1	11	97	101	0	0.1	1
27	142	143	0.1	0.1	-1	10	93	97	0	0.1	-1
26	141	142	0.1	0.1	-1	9	84	93	0	0.1	-1
25	140	141	0.1	0.1	-1	8	73	84	0	0.1	1
24	139	140	0.1	0.1	-1	7	64	73	0	0.1	-1
23	138	139	0.1	0.1	-1	6	56	64	0	0.1	-1
22	137	138	0.1	0.1	-1	5	49	56	0	0.1	-1
21	136	137	0.1	0.1	-1	4	44	49	0	0.1	-1
20	135	136	0.1	0.1	-1	3	33	44	0	0.1	-1
19	131	135	0.1	0.1	-1	2	24	33	0	0.1	-1
18	127	131	0.1	0.1	-1	1	0	24	0	0.1	-1

Печь разбивается на участки в зависимости от конструкции печи и ожидаемого изменения свойств материала. Так, определяющими параметрами является внутренний диаметр, динамический угол откоса материала, статический угол откоса материала, насыпной вес

материала и средний расход материала (кг/кг спека), наличие теплообменных устройств. При задании секций следует учесть, что алгоритм расчёта предполагает, что на всем протяжении участка высота слоя материала, либо только повышается, либо только убывает. Задаётся ожидаемое направление изменения с помощью знака угла γ на данном участке. Если высота уменьшается, то угол γ имеет знак минус, если увеличивается, то плюс.

Также при разделении печи на участки следует учитывать, что остальные модели с зональным принципом расчета также используют рассматриваемые участки, поэтому определение участков должно производиться индивидуально для каждой печи при пусконаладке данной системы. При расчете реальной печи было выделено 34 участка, большая часть из которых сосредоточены в зоне факела, так как на данных участках происходит соединение с зоной факела. Значительно сокращение количества участков в данной области приводит к существенным отклонением в результатах расчета модели. Также следует обратить внимание, что свойства материала (β , φ , ρ_{bulk} , G_m) для каждой зоны определяются по графику (рисунок 3.3-3.6) с помощью интерполяции на основе сначала начальных приближений температуры (на нулевом шаге расчета комплексной модели процесса) и на основе рассчитанных значений температуры материала на последующих значениях температуры процесса. Графики для получения параметров получены на основе материалов работы [29].

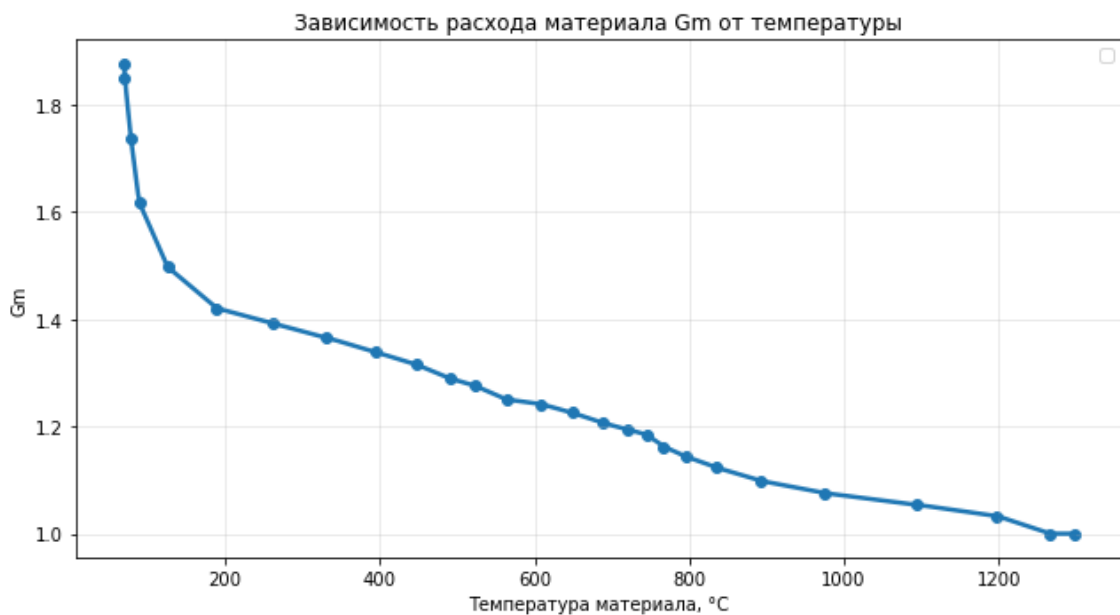


Рисунок 3.3 – Зависимость расхода материала G_m от температуры материала [29]



Рисунок 3.4 – Зависимость статического угла откоса материала φ от температуры материала [29]

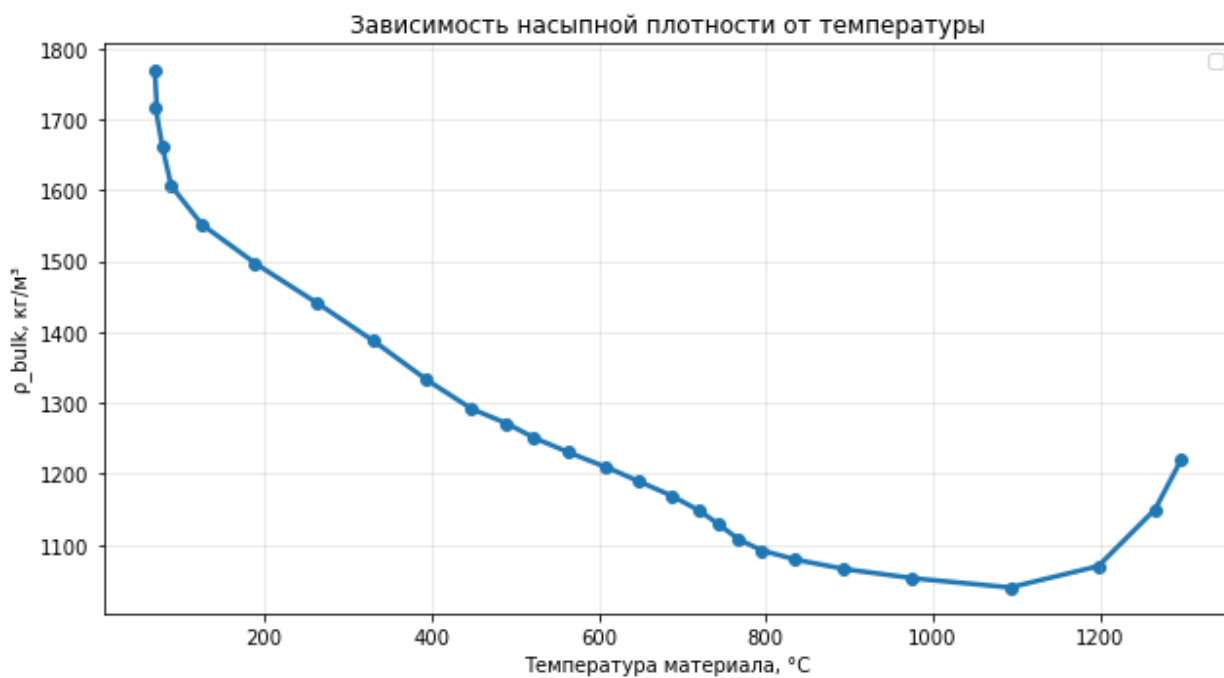


Рисунок 3.5 – Зависимость насыпной плотности материала ρ_{bulk} от температуры материала [29]

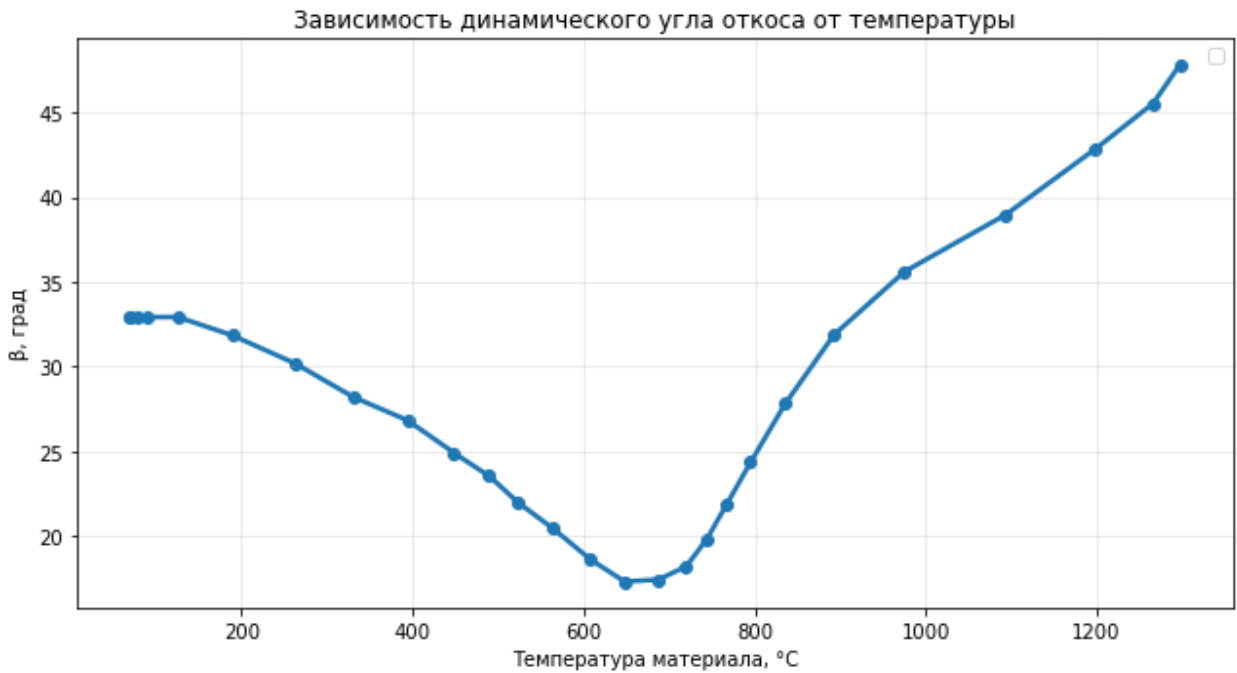


Рисунок 3.6 – Зависимость динамического угла откоса материала β от температуры материала [29]

Остальные данные подбирались на основе материалов из рисунка 1.4.

Участок № 1 является участком с цепной завесой, поэтому у него также заданы параметры, соответствующие цепной зоне (таблица 3.4).

Таблица 3.4 – Параметры участка с цепной зоной (по данным автора)

№	Обозначение	Описание	Значение	Единицы измерения	Источник
Общая информация для участков					
1	k_2	Безразмерный коэффициент, характеризующий внутреннее сопротивление	0.941	-	[29]
2	F_{chain}	Флаг наличия цепной завесы на участке	True	-	
3	$\frac{F_c}{F_{ca}}$	Плотность навески цепей	3.7	-	[1]
4	γ	Продольный угол гирлянды	58	град	[1]
5	k_3	Безразмерный коэффициент свойств материала	0.155	-	[1]

В результате расчета с данными входными параметрами по алгоритму, описанному во второй главе (рисунок 2.28), получены следующие результаты (рисунки 3.7, 3.8).

По графикам на рисунке 3.7 и 3.8 можно отметить, что в зоне факела действительно необходимо увеличение количества расчетных зон из-за резкого изменения температуры в этой области и соответственно изменения свойств материала. Полученные графики не противоречат данным представленным в научной литературе [29].

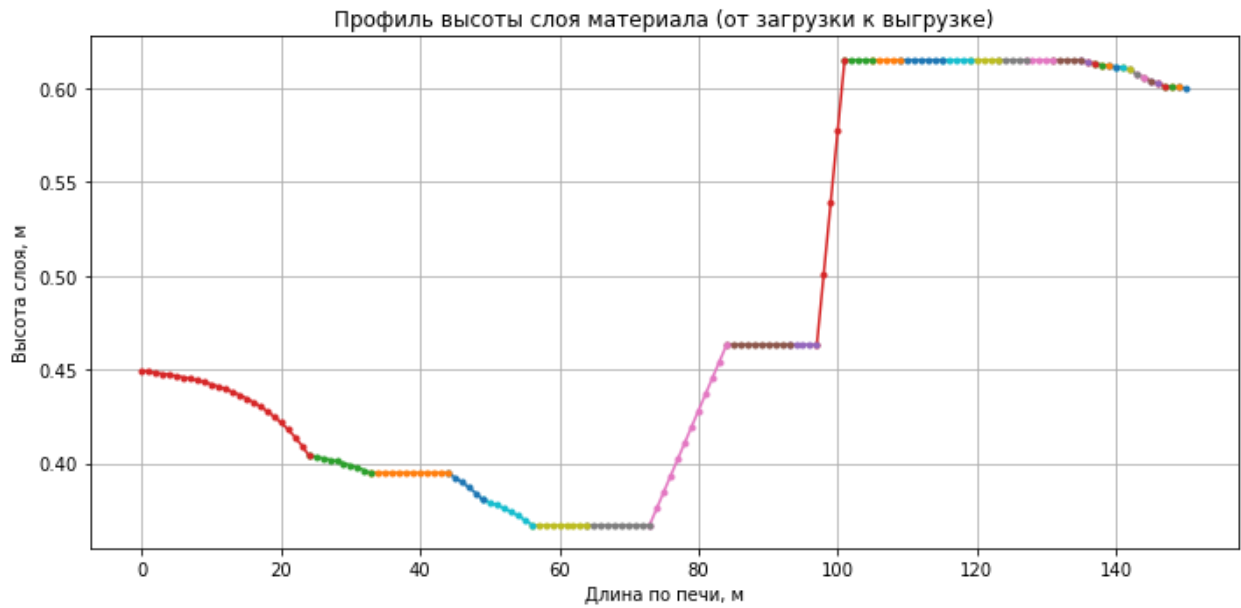


Рисунок 3.7 – Профиль высоты слоя материала (составлено автором)

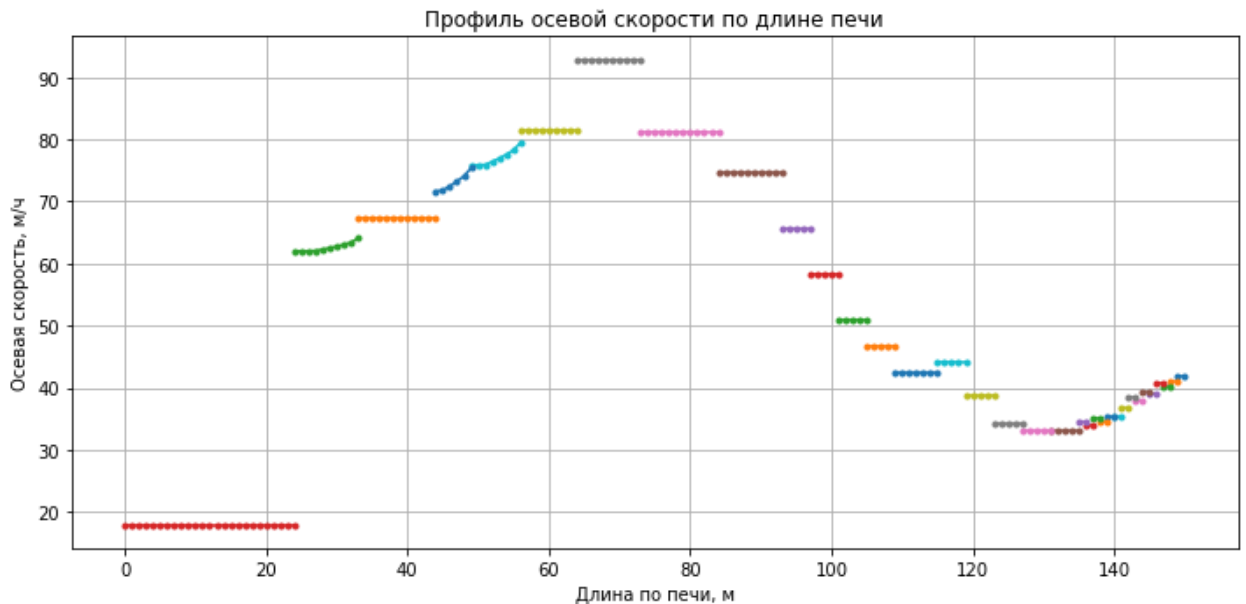


Рисунок 3.8 – Профиль скорости движения материала (составлено автором)

3.3 Модель пылеуноса и пылевозврата в ТВП

Алгоритм расчета модели пылевозврата и пылеуноса представлен на рисунке 3.9.

Шаг 1 – Ввод данных

Для расчета модели необходимо указать профили уноса (таблица 3.5) и возврата пыли (таблица 3.6) из литературы. Для этого будут использованы данные из [67]. Для того, чтобы совместить данные изложенные в работе [67] к виду, который можно использовать при зональном расчете на участках будем использовать гауссовское или равномерное распределение.

Кроме того, в качестве входных данных также необходимо указать значения расходов (таблица 3.7).



Рисунок 3.9 – Алгоритм расчета модели пылевозврата и пылеуноса (составлено автором)

Таблица 3.5 – Входные данные о пылеуносе (по данным автора)

№	Диапазон участка	Доля от общего S_r	Тип распределения	Пик возврата $x_{\text{пик}}$	Источник
1	0 – 43 м	0.6	Гауссовское	32 м	[67]
2	43 – 92 м	0.1	Равномерное	-	[67]
3	92 – 115 м	0.3	Гауссовское	94 м	[67]
4	115 – 150 м	0	Равномерное	-	[67]

Таблица 3.6 – Входные данные о пылевозврате (по данным автора)

№	Диапазон участка	Доля от общего S_u	Тип распределения	Пик возврата $x_{\text{пик}}$	Источник
1	0 – 43 м	0.35	Гауссовское	12 м	[67]
2	43 – 105 м	0.4	Гауссовское	80 м	[67]
3	105 – 140 м	0.25	Гауссовское	130 м	[67]
4	140 – 150 м	0	Равномерное	-	[67]

Таблица 3.7 – Общие входные данные (по данным автора)

№	Обозначение	Описание	Значение	Единицы измерения	Источник
1	$G_{\text{спек}}$	Производительность печи по спеку	38 000	кг/ч	[1]
2	$G_{\text{п}}$	Общий пылеунос	14 000	кг/ч	[3][1]
3	$G_{\text{п.воз}}$	Общий пылевозврат	13 000	кг/ч	[1]
4	σ_{rel}	Относительная ширина гауссова распределения	0.25	-	-
5	$Ne_{\text{р}}^{\text{п}}$	Массовая доля нефелина в составе пыли	50.5	%	[36]
6	$CaCO_3^{\text{п}}$	Массовая доля $CaCO_3$ в составе пыли	49	%	[36]

Шаг 2 – Разделение печи на секции

В соответствии с разделением из таблицы 3.3 печь по оси делится на заданное количество участков. В рассматриваемом случае на 34 участка.

Шаг 3 – Задание зон пылевозврата и пылеуноса по длине печи на основе статистической информации и равномерного и гауссовского распределения

На основе информации из таблиц 3.5 и 3.6 определяется какая доля от общего пылеуноса и пылевозврата происходит на заданном участке.

3.1 В случае гауссовского распределения это происходит следующим образом. Определяется принадлежность каждого участка из таблицы 3.3 к зонам из таблицы 3.5 и 3.6 по координатам.

3.2 Затем для каждого из участка таблицы 3.3 рассчитывается веса по гауссовскому распределению (3.1)

$$w_i = e^{-0.5 \left(\frac{x_i - x_{\text{пик}}}{\sigma_{\text{rel}} L_{\text{zone}}} \right)^2} \quad (3.1)$$

где x_i – координата середины участка из таблицы 3.3,

L_{zone} – длина зоны, м,

$x_{\text{пик}}$ – координата пика распределения в зоне из таблиц 3.5 и 3.6.

3.3 После чего веса нормируются (3.2-3.3)

$$f_u^i = S_u \frac{w_i}{\sum w_i} \quad (3.2)$$

$$f_r^i = S_r \frac{w_i}{\sum w_i} \quad (3.3)$$

По формулам 3.2 и 3.3 соответственно вычисляется доля уноса и возврата пыли на заданном i -ом участке в зоне с гауссовским распределением.

3.4 Для нормального распределения вычисляется количество участков N из таблицы 3.3 попавших в диапазон зон из таблиц 3.5 и 3.6. После чего общая доля этой зоны делится на количество участков. Соответственно расчет долей уноса и возврата пыли на заданном i -ом участке в зоне с равномерным распределением можно описать уравнениям 3.4 и 3.5.

$$f_u^i = \frac{S_u}{N} \quad (3.4)$$

$$f_r^i = \frac{S_r}{N} \quad (3.5)$$

В результате формируются профили на рисунках 3.10 и 3.11

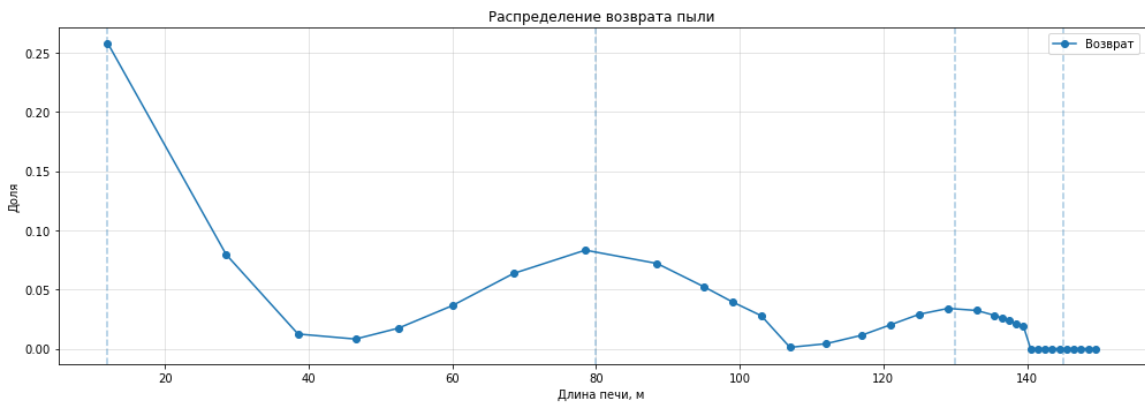


Рисунок 3.10 – Профиль распределение возврата пыли (составлено автором)

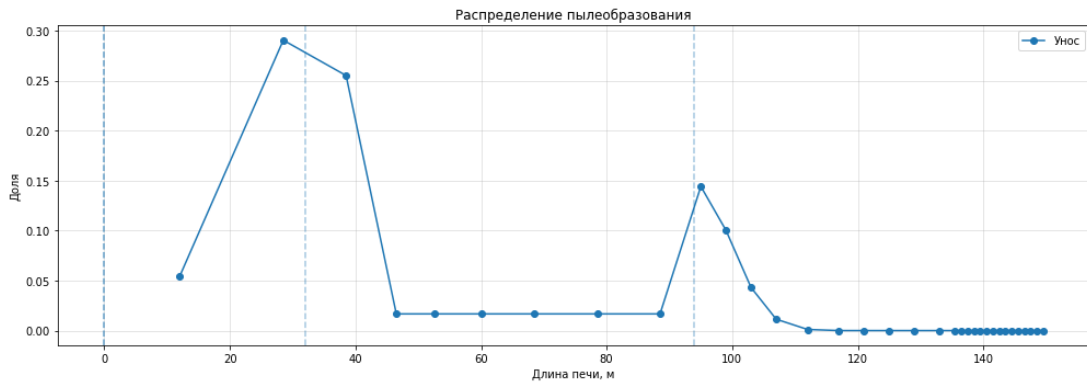


Рисунок 3.11 – Профиль распределение пылеобразования (составлено автором)

Шаг 4 – Локальный баланс пыли в газовой фазе внутри участков

Расчет будет осуществляться от последнего участка в зоне охлаждения к первому участку в загрузке печи. Для наглядности рассмотрим пример с расчетом для четырех участков, где нулевым участком – является участок в области цепной завесы, а третьим – участок в зоне охлаждения. Тогда расчет можно представить с помощью выражений 3.6-3.13.

$$G_{п.вх}^3 = 0 \quad (3.6)$$

$$G_{п.вых}^3 = G_{п.вх}^3 \quad (3.7)$$

$$G_{п.вх}^2 = G_{п.вых}^3 \quad (3.8)$$

$$G_{\text{П.ВЫХ}}^2 = G_{\text{П.ВХ}}^2 + f_u^2 G_{\text{П}} - f_r^2 G_{\text{П.ВОЗ}} + G_{\text{П.ВОЗ}} \quad (3.9)$$

$$G_{\text{П.ВХ}}^1 = G_{\text{П.ВЫХ}}^2 \quad (3.10)$$

$$G_{\text{П.ВЫХ}}^1 = G_{\text{П.ВХ}}^1 + f_u^1 G_{\text{П}} - f_r^1 G_{\text{П.ВОЗ}} \quad (3.11)$$

$$G_{\text{П.ВХ}}^0 = G_{\text{П.ВЫХ}}^1 \quad (3.12)$$

$$G_{\text{П.ВЫХ}}^0 = G_{\text{П.ВХ}}^0 + f_u^0 G_{\text{П}} - f_r^0 G_{\text{П.ВОЗ}} \quad (3.13)$$

где $G_{\text{П.ВХ}}^i$ и $G_{\text{П.ВЫХ}}^i$ – расход пыли на входе и выходе из i -участка соответственно, кг/ч,
 $G_{\text{П}}$ – общий пылеунос, кг/ч.

Шаг 5 – Расчет изменения расхода материала

Расчет количества пыли, которая осела и улетела на рассматриваемом участке выполняется по уравнению 3.14

$$\Delta G = f_r^i G_{\text{П.ВОЗ}} - f_u^i G_{\text{П}} \quad (3.14)$$

Шаг 6 – Материальный баланс компонентов пыли

Зная изменение расхода материала из-за пылеуноса и пылевозврата внутри участка, производительность печи по спеку и состав пыли в массовых долях, можно определить изменение удельного расхода компонентов шихты по формуле 3.15.

$$\Delta G_{\text{Соед}} = \frac{\text{Соед}^{\text{П}}}{100} \frac{\Delta G}{G_{\text{спек}}} \quad (3.15)$$

где ΔG – изменение расхода материала из-за пылеуноса и пылевозврата, кг/ч,

$G_{\text{спек}}$ – производительность печи по спеку, кг/ч

В качестве Соед^П используются соответственно $\text{Nep}^{\text{П}}$ и $\text{CaCO}_3^{\text{П}}$

Результаты расчета модели пылеуноса и пылевозврата можно представить в виде профилей на рисунках 3.12 и 3.13.

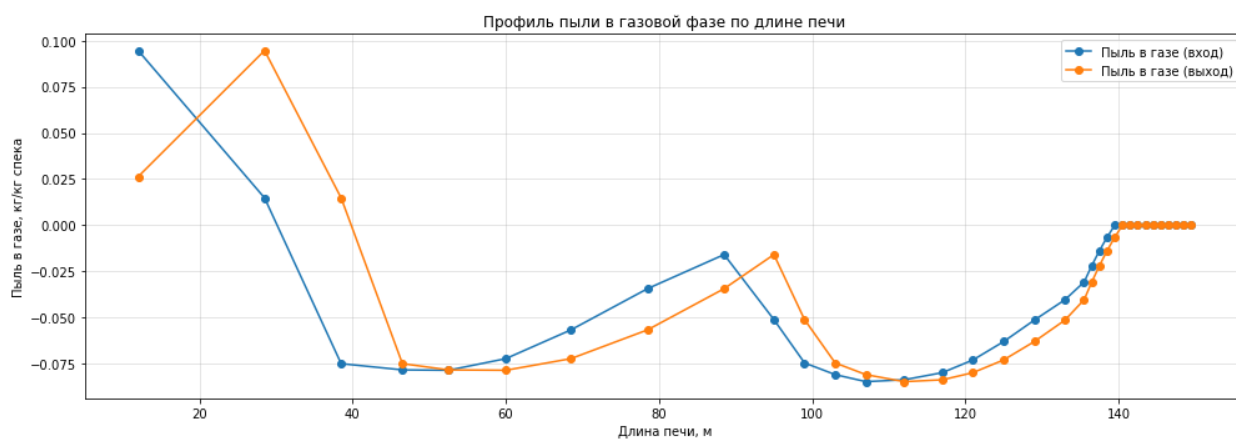


Рисунок 3.12 – Профиль изменения пыли в газовой фазе по длине печи (составлено автором)

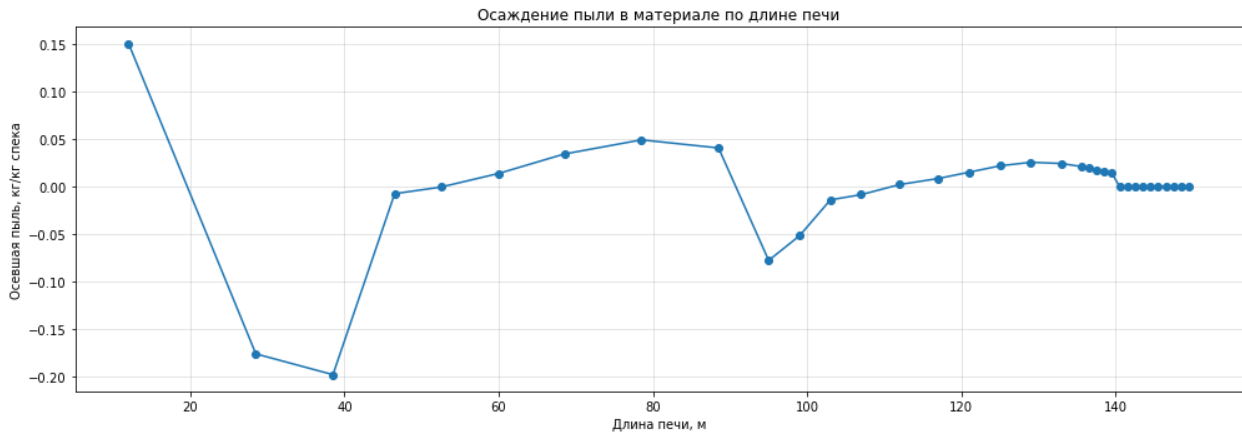


Рисунок 3.13 – Профиль изменения осевшей пыли по длине печи (составлено автором)

3.4 Модель горения факела

В качестве модели горения факела был выбрана аналитическая модель диффузионного факела, описанная в работе [58]. Данная модель рассчитывается в собственной системе координат начало которой лежит в месте начала газовой струи факела. Факел разделяется на два участка: струйный и догорания, в алгоритме и программном коде они были названы «jet» и «afterburn» соответственно. Отличие заключается в том, что на струйном участке воздух постепенно увлекается струей до тех пор, пока не будет полностью увлечен весь воздух, поступающий в печь, тогда и начинается расчет участка догорания. В основе расчета лежит итеративное вычисление температуры и плотности газовой струи. Для более полного понимания модели перейдем к пошаговому описанию алгоритма расчета (рисунок 3.14).

Шаг 1 – Ввод данных

Для расчета модели необходимо указать следующие пять групп параметров: состав газообразного топлива, параметры материальных потоков, Конструктивные и технологические параметры, константы, приближения и справочные данные, параметры расчета. Входные данные, использованные для расчета представлены в таблицах 3.8-3.12.

Так как в рассмотренной литературе об исследуемом предприятии не указан точный применяемого газообразного топлива для расчета был взят типовой состав из книги [28]. На первом этапе расчета температура стенки берется ориентировочно температуры газа, после за температуру стенки принимается значение, рассчитанное в модели теплообмена.

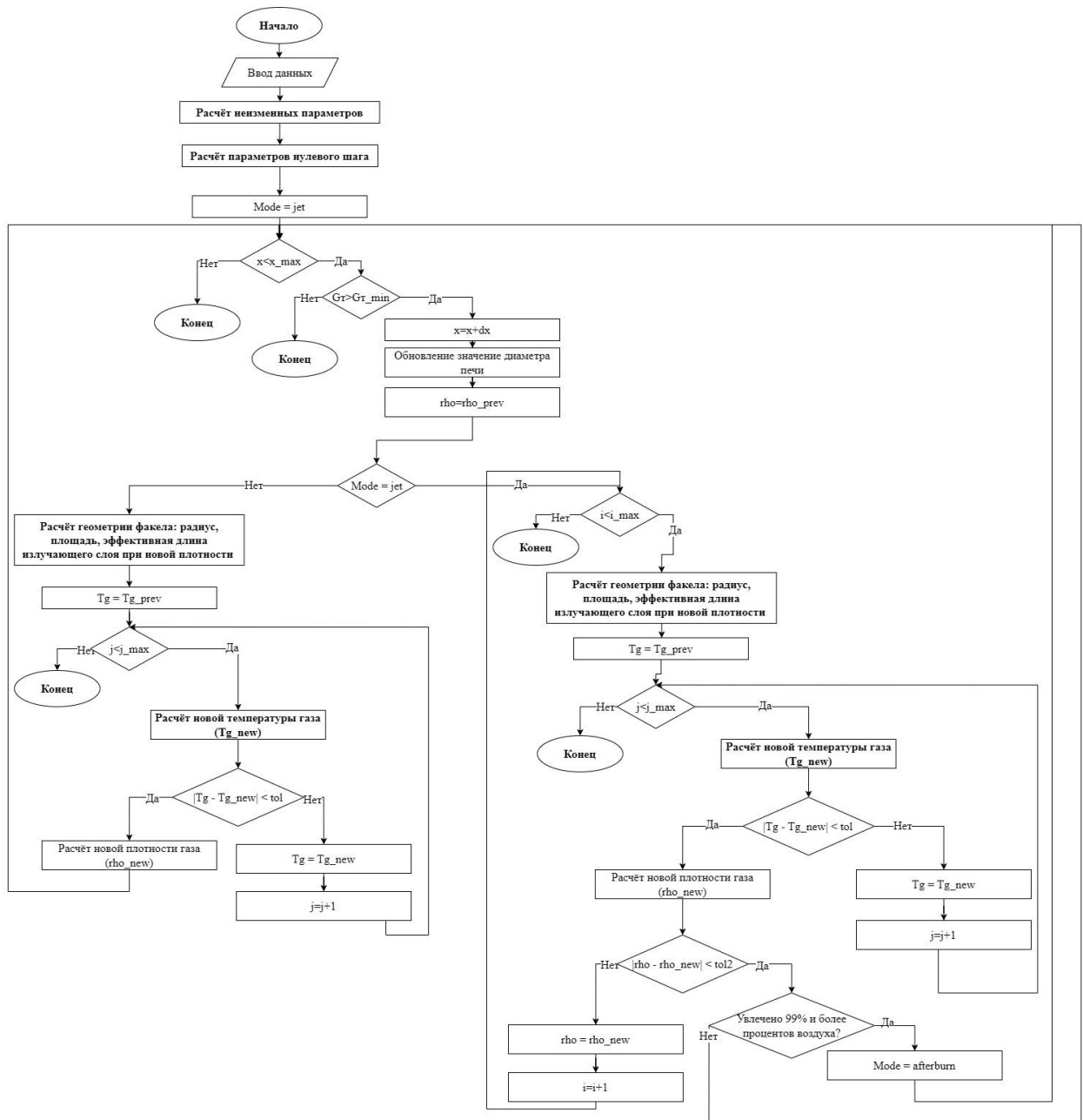


Рисунок 3.14 – Алгоритм расчета модели горения факела (составлено автором)

Таблица 3.8 – Состав газообразного топлива (по данным автора)

Обозначение	Описание	Значение	Единицы измерения	Источник
CH_4	Объемная доля CH_4 в топливе	94	%	[28]
C_2H_6	Объемная доля C_2H_6 в топливе	2.8	%	[28]
C_3H_8	Объемная доля C_3H_8 в топливе	0.4	%	[28]
C_4H_{10}	Объемная доля C_4H_{10} в топливе	0.3	%	[28]
C_5H_{12}	Объемная доля C_5H_{12} в топливе	0.1	%	[28]

Таблица 3.9 – Параметры материальных потоков (по данным автора)

№	Обозначение	Описание	Значение	Единицы измерения	Источник
Газы					
1	$\rho_{air.0}$	Плотность воздуха при нормальных условиях	1.293	кг/м ³	[28]
2	$\rho_{т.0}$	Плотность топлива при нормальных условиях	0.8	кг/м ³	[28]
3	$\rho_{CO_2.0}$	Плотность CO_2 при нормальных условиях	1.977	кг/м ³	[28]
4	$\rho_{N_2.0}$	Плотность N_2 при нормальных условиях	1.250	кг/м ³	[28]
5	$\rho_{H_2O.0}$	Плотность H_2O при нормальных условиях	0.804	кг/м ³	[28]
6	Q_{CO_2}	Тепловой эффект диссоциации CO_2	12 690	кДж/м ³	[28]
7	Q_{H_2O}	Тепловой эффект диссоциации H_2O	10 800	кДж/м ³	[28]
8	$c_{т.0}$	Теплоемкость топлива	2.2	$\frac{кДж}{м^3К}$	[28]
9	$Air_{г}$	Доля организованного воздуха, подаваемого в горелку	0.177	-	[56]
10	$Air_{п}$	Доля организованного воздуха, подаваемого с пылью	0.233	-	[56]
11	$Air_{неорг}$	Доля неорганизованного воздуха	0.588	-	[56]
12	$T_{Air_{г}}$	Температура организованного воздуха, подаваемого в горелку	80	°С	[56]
13	$T_{Air_{п}}$	Температура организованного воздуха, подаваемого с пылью	65	°С	[56]
14	$T_{Air_{неорг}}$	Температура неорганизованного воздуха	12	°С	[56]
15	$T_{т}$	Температура топлива	10	°С	[56]
Пыль					
16	$d_{п}$	Средний диаметр частиц пыли	$50 \cdot 10^{-6}$	м	[14]
17	$\rho_{п}$	Плотность пыли	2600	кг/м ³	[14]
18	$G_{п}$	Общий пылеунос	14 000	кг/ч	[3][1]
19	$Ne_{п}$	Массовая доля нефелина в составе пыли	50.5	%	[36]
20	$CaCO_3^{п}$	Массовая доля $CaCO_3$ в составе пыли	49	%	[36]
21	$\mu_{п}$	Концентрация			

Таблица 3.10 – Конструктивные и технологические параметры (по данным автора)

Обозначение	Описание	Значение	Единицы измерения	Источник
d_0	Диаметр сопла горелки	0.091	м	[37]
α_B	Коэффициент избытка воздуха	1.10	кг/м ³	[56]
$u_{т.0}$	Скорость топлива на выходе из сопла	300	м/с	[37]
$D_{вн}$	Внутренний диаметр	Выбирается согласно рисунку 1.4 и координате	м	[29]

Таблица 3.11 – Константы, приближения и справочные данные (по данным автора)

Обозначение	Описание	Значение	Единицы измерения	Источник
S_{ct}	Турбулентное число Шмидта	0.75	-	[58]
ε_{st}	Степень черноты стенки	0.75	-	[58]
σ_{CB}	Постоянная Стефана-Больцмана	$5.67 \cdot 10^{-8}$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4}$	-
p_{gas}	Давление газовой смеси	101 325	кПа	-
T_{st}	Первое приближение температуры стенки в зоне факела	$0.8T_r$	°С	[58]
α_{CO_2}	Степень диссоциации CO_2	Таблица Б.6	-	[28]
α_{H_2O}	Степень диссоциации H_2O	Таблица Б.5	-	[28]
c_{CO_2}	Теплоемкость CO_2	Таблица Б.1	$\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \text{К}}$	[28]
c_{N_2}	Теплоемкость N_2	Таблица Б.1	$\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \text{К}}$	[28]
c_{O_2}	Теплоемкость O_2	Таблица Б.1	$\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \text{К}}$	[28]
c_{H_2O}	Теплоемкость H_2O	Таблица Б.1	$\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \text{К}}$	[28]
c_{SO_2}	Теплоемкость SO_2	Таблица Б.1	$\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \text{К}}$	[28]
c_{air}	Теплоемкость воздуха	Таблица Б.1	$\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \text{К}}$	[28]
$c_{неф}$	Теплоемкость нефелина	Таблица Б.7	$\frac{\text{ккал}}{\text{кг} \text{ } ^\circ\text{С}}$	[13]
$c_{изв}$	Теплоемкость известняка	Таблица Б.7	$\frac{\text{ккал}}{\text{кг} \text{ } ^\circ\text{С}}$	[13]

Таблица 3.12 – Параметры расчета (по данным автора)

Обозначение	Описание	Значение	Единицы измерения	Источник
x_{max}	Максимальная длина факела	150	м	-
$G_{т.min}$	Минимальный остаток топлива для остановки расчёта	0.01	кг/с	-
i_{max}	Максимальное количество итераций по плотности	50	-	-
j_{max}	Максимальное количество итераций по температуре	50	-	-
tol	Критерий сходимости по температуре	0.001	-	-
$tol2$	Критерий сходимости по плотности	0.001	-	-

Шаг 2 – Расчёт неизменных параметров

2.1 Расчет энтальпии воздуха, кДж/кг (3.16)

$$H_{air} = \frac{c_{air}(T_{Air_r})T_{Air_r} + c_{air}(T_{Air_n})T_{Air_n} + c_{air}(T_{Air_{неорг}})T_{Air_{неорг}}}{\rho_{air.0}} \quad (3.16)$$

где c_{air} – теплоемкость воздуха, $\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3\text{К}}$,

T_{Air_r} – температура организованного воздуха, подаваемого в горелку, °С,

T_{Air_n} – температура организованного воздуха, подаваемого с пылью, °С,

$T_{Air_{неорг}}$ – температура неорганизованного воздуха, °С,

$\rho_{air.0}$ – плотность воздуха при нормальных условиях, кг/м^3 .

2.2 Расчет начального расхода топлива, кг/с (3.17)

$$G_0 = u_{т.0} \frac{\pi d_0^2}{4} \rho_{т.0} \quad (3.17)$$

где $u_{т.0}$ – скорость топлива на выходе из сопла, м/с,

d_0 – диаметр сопла горелки, м,

$\rho_{т.0}$ – плотность топлива при нормальных условиях, кг/м^3 .

2.3 Расчет энтальпии топлива, кДж/кг (3.18)

$$H_T = \frac{c_{т.0} T_T}{\rho_{т.0}} \quad (3.18)$$

где $c_{т.0}$ – теплоемкость топлива, $\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3\text{К}}$,

T_T – температура топлива, °С.

2.4 Расчет низшей теплоты сгорания топлива, кДж/кг

Расчёт производится на основе формулы из работы [28] (3.19).

$$Q_H^m = \frac{10(35.82 \cdot C_{H_4} + 63.75 \cdot C_{H_6} + 91.3 \cdot C_{H_8} + 118 \cdot C_{H_{10}} + 146 \cdot C_{H_{12}})}{\rho_{т.0}} \quad (3.19)$$

2.5 Теоретический объем воздуха необходимый для сгорания 1 м³ газообразного топлива, м³/м³ (3.20)

$$V_B^0 = 0.0476(2 \cdot C_{H_4} + 3.5 \cdot C_{H_6} + 5 \cdot C_{H_8} + 6.5 \cdot C_{H_{10}} + 8 \cdot C_{H_{12}}) \quad (3.20)$$

2.6 Количество образующихся продуктов горения на 1 м³ газообразного топлива, м³/м³ (3.21-3.24)

$$V_{CO_2} = 0.01(C_{H_4} + 2 \cdot C_{H_6} + 3 \cdot C_{H_8} + 4 \cdot C_{H_{10}} + 5 \cdot C_{H_{12}}) \quad (3.21)$$

$$V_{H_2O} = 0.01(2 \cdot C_{H_4} + 3 \cdot C_{H_6} + 4 \cdot C_{H_8} + 5 \cdot C_{H_{10}} + 6 \cdot C_{H_{12}}) \quad (3.22)$$

$$V_{N_2} = 0.79V_B^0 \quad (3.23)$$

$$V_{пр} = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} \quad (3.24)$$

где V_{N_2} – количество образующегося N_2 на 1 м³ газообразного топлива, м³/м³,

V_{CO_2} – количество образующегося CO_2 на 1 м³ газообразного топлива, м³/м³,

V_{H_2O} – количество образующегося H_2O на 1 м³ газообразного топлива, м³/м³,

V_B^0 – теоретический объем воздуха необходимый для сгорания 1 м³ газообразного топлива, м³/м³.

$V_{пр}$ – количество образующихся продуктов горения на 1 м³ газообразного топлива, м³/м³.

2.7 Расчёт доли компонентов продуктов сгорания (3.25-3.27)

$$y_{CO_2} = \frac{V_{CO_2}}{V_{пр}} \quad (3.25)$$

$$y_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{V_{пр}} \quad (3.26)$$

$$y_{N_2} = \frac{V_{N_2}}{V_{пр}} \quad (3.27)$$

2.8 Расчет плотности продуктов сгорания при нормальных условиях, кг/м³ (3.28)

$$\rho_{пр.0} = \rho_{CO_2.0} y_{CO_2} + \rho_{H_2O.0} y_{H_2O} + \rho_{N_2.0} y_{N_2} \quad (3.28)$$

где $\rho_{CO_2.0}$ – плотность CO_2 при нормальных условиях, кг/м³,

$\rho_{N_2.0}$ – плотность N_2 при нормальных условиях, кг/м³,

$\rho_{H_2O.0}$ – плотность H_2O при нормальных условиях, кг/м³,

y_{CO_2} – объемная доля CO_2 в продуктах горения,

y_{H_2O} – объемная доля H_2O в продуктах горения,

y_{N_2} – объемная доля N_2 в продуктах горения.

2.9 Расчет стехиометрического массового соотношения воздуха и топлива (3.29)

$$n_B = V_B^0 \frac{\rho_{air.0}}{\rho_{т.0}} \quad (3.29)$$

где V_B^0 – Теоретический объем воздуха необходимый для сгорания 1 м³ газообразного топлива, м³/м³,

$\rho_{air.0}$ – Плотность воздуха при нормальных условиях, кг/м³,

$\rho_{т.0}$ Плотность топлива при нормальных условиях, кг/м³,

2.10 Расчет полного расхода воздуха, кг/с (3.30)

$$G_B = \alpha_B n_B G_0 \quad (3.30)$$

где α_B – коэффициент избытка воздуха,

n_B – стехиометрическое массовое соотношение воздуха и топлива,

G_0 – начальный расход топлива, кг/с.

Шаг 3 – Расчёт неизменных параметров нулевого шага

3.1 Начальные значения

Задаётся начальное значение координаты x от горячего конца печи. Расход воздуха, увлеченного струей, принимается равным нулю.

3.2 Расчет расстояния до полюса струи, м (3.31)

$$x_0 = 2.37 d_0 \sqrt{\frac{\rho_{т.0}}{\rho_{т.0}}} \quad (3.31)$$

3.3 Расчет длины факела, м (3.32)

$$l_\phi = x_0 ((n_B + 1)(2S_{ct} + 1) - 1) \quad (3.32)$$

3.4 Расчет расхода несгоревшего топлива, кг/с (3.33)

$$G_T = \frac{x+x_0}{n_B x_0} \left(\frac{1}{2S_{ct}+1} \frac{l_\phi+x_0}{x+x_0} + \frac{2S_{ct}}{2S_{ct}+1} \left(\frac{x+x_0}{l_\phi+x_0} \right)^{\frac{1}{2S_{ct}}-1} \right) G_0 \quad (3.33)$$

где S_{ct} – турбулентное число Шмидта,

x_0 – расстояние до полюса струи, м,

l_ϕ – длина факела, м,

n_B – стехиометрическое массовое соотношение воздуха и топлива.

3.5 Расчет объемных расходов компонентов смеси, м³/с (3.34-3.37)

$$V_T^\varphi = \frac{G_T}{\rho_{т.0}} \quad (3.34)$$

$$V_B^\varphi = \frac{G_B - (G_0 - G_T) n_B}{\rho_{air.0}} \quad (3.35)$$

$$V_{пр}^\varphi = \frac{(G_0 - G_T)(1 + n_B)}{\rho_{пр.0}} \quad (3.36)$$

$$V_G^\varphi = V_T^\varphi + V_B^\varphi + V_{пр}^\varphi \quad (3.37)$$

где G_T – расход несгоревшего топлива, кг/с,

G_B – расход воздуха, кг/с,

G_0 – начальный расход топлива, кг/с,

V_T^φ – объемный расход топлива, м³/с

V_B^φ – объемный расход воздуха, м³/с

$V_{пр}^\varphi$ – объемный расход продуктов горения, м³/с

V_G^φ – объемный расход газовой смеси, м³/с.

3.6 Расчет долей компонентов газовой смеси (3.38-3.40)

$$y_T = \frac{V_T^\varphi}{V_G^\varphi} \quad (3.38)$$

$$y_B = \frac{V_B^\varphi}{V_G^\varphi} \quad (3.39)$$

$$y_{\text{пр}} = \frac{V_{\text{пр}}^\varphi}{V_G^\varphi} \quad (3.40)$$

3.7 Расчет плотности газовой смеси кг/м³ (3.41)

$$\rho_{g,0} = \rho_T y_T + \rho_B y_B + \rho_{\text{пр}} y_{\text{пр}} \quad (3.41)$$

3.8 Задание начальных условий (3.42, 3.43)

$$\rho_{prev} = \rho_{g,0} \quad (3.42)$$

$$T_{г.prev} = T_{г.init} \quad (3.43)$$

где ρ_{prev} – плотность газовой смеси на прошлом шаге расчета, кг/м³,

$T_{г.prev}$ – температура газа на прошлом шаге расчета, °С.

3.9 Установка флага Mode в значение «jet»

Шаг 4 – Проверка достижения максимальной длины

Выполняется ли условие (3.44):

$$x < x_{max} \quad (3.44)$$

Если условие выполняется, то алгоритм переходит к шагу расчета 5, если не выполняется, то расчёт прекращается с сообщением об ошибке расчёта.

Шаг 5 – Проверка полного сгорания топлива

Выполняется ли условие (3.45):

$$G_T > G_{T.min} \quad (3.45)$$

Если условие не выполняется, то алгоритм переходит к шагу расчета 6, если выполняется, то расчёт прекращается и считается выполненным корректно.

Шаг 6 Смещение по осевой координате (3.46)

$$x = x + \Delta x \quad (3.46)$$

Шаг 7 Обновление значения диаметра печи

Осевая координат связана с описанием участков, в случае если при переходе к новому значению по осевой координате участок меняется на другой с отличными параметрами ФРП, то происходит обновление геометрических параметров.

Шаг 8 – Плотность с прошлой итерации принимается текущей

Шаг 9 – Проверка в каком в каком состоянии находится флаг режима расчёта

Если флаг Mode находится в состоянии «jet», то выполняется шаг 10, если нет, то 19.

Шаг 10 – Проверка достигнута ли максимальная итерация по плотности

Выполняется ли условие (3.47):

$$i < i_{max} \quad (3.47)$$

Если условие выполняется, то алгоритм переходит к шагу расчета 11, если не выполняется, то расчёт прекращается с сообщением об ошибке расчёта.

Шаг 11 – Расчёт геометрии факела

11.1 Расчёт воздуха, увлеченного струей на данном участке, кг/с (3.48)

$$\Delta G_B = \left(0.322 \frac{\Delta x}{d_0} \sqrt{\frac{\rho_{cp}}{\rho_{g,0}}} \right) G_0 \quad (3.48)$$

11.2 Расчёт усредненной плотности, кг/с (3.49)

$$\rho_{cp} = \rho_{т.0} \left(3.1 \frac{d_0 G_B}{x G_0} \right)^2 \quad (3.49)$$

где $\rho_{т.0}$ – плотность топлива при нормальных условиях, кг/м³.

11.3 Расчет расстояния до полюса струи, м (3.50)

$$x_0 = 2.37 d_0 \sqrt{\frac{\rho_{т.0}}{\rho_{cp}}} \quad (3.50)$$

Шаги 11.4 – 11.7 полностью повторяют шаги 3.3 – 3.6

11.8 Расчет радиуса факела, м

$$R_\phi = 0.211(x + x_0) \quad (3.51)$$

11.9 Расчет площади участка боковой поверхности факела на данном осевом шаге, м²

$$\Delta F_\phi = 2\pi R \Delta x \quad (3.52)$$

11.10 Расчет эффективной длины лучеиспускающего слоя, м

$$l_{ef} = 1.8 R_\phi \quad (3.53)$$

11.11 Расчет долей излучающих компонентов в смеси

$$y_{CO_2}^{mix} = y_{CO_2} y_{пр} \quad (3.54)$$

$$y_{H_2O}^{mix} = y_{H_2O} y_{пр} \quad (3.55)$$

$$y_{\Sigma}^{mix} = y_{CO_2}^{mix} + y_{H_2O}^{mix} \quad (3.56)$$

Шаг 12 – Принимаем температуру газа на текущем участке равной температуре газа на прошлом участке**Шаг 13 – Проверка достигнута ли максимальная итерация по температуре**

Выполняется ли условие (3.57):

$$j < j_{max} \quad (3.57)$$

Если условие выполняется, то алгоритм переходит к шагу расчета 14, если не выполняется, то расчёт прекращается с сообщением об ошибке расчёта.

Шаг 14 – Расчёт новой температуры газа

14.1 Расчет объемной теплоемкости продуктов сгорания, $\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3\text{К}}$ (3.58)

$$c_{\text{пр}} = c_{\text{CO}_2}(T_{\Gamma})y_{\text{CO}_2} + c_{\text{H}_2\text{O}}(T_{\Gamma})y_{\text{H}_2\text{O}} + c_{\text{N}_2}(T_{\Gamma})y_{\text{N}_2} \quad (3.58)$$

14.2 Расчет массовой теплоемкости продуктов сгорания, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$ (3.59)

$$c_{\text{пр}}^m = \frac{1000c_{\text{пр}}}{\rho_{\text{пр.0}}} \quad (3.59)$$

14.3 Расчет массовой теплоемкости воздуха, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$ (3.60)

$$c_{\text{air}}^m = \frac{1000c_{\text{air}}(T_{\Gamma})}{\rho_{\text{air.0}}} \quad (3.60)$$

14.4 Расчет массовой теплоемкости топлива, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$ (3.61)

$$c_{\text{T}}^m = \frac{1000c_{\text{T.0}}}{\rho_{\text{T.0}}} \quad (3.61)$$

14.5 Расчет массовой теплоемкости пыли, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$ (3.62)

$$c_{\text{п}} = 4186 \left(\frac{N_{\text{ep}}^{\text{п}}}{100} c_{\text{неф}}(T_{\Gamma}) + \frac{CaCO_3^{\text{п}}}{100} c_{\text{изв}}(T_{\Gamma}) \right) \quad (3.62)$$

14.6 Расчет массового расхода газопылевой смеси, кг/с (3.63)

$$G_{\Sigma} = G_{\text{в}} + G_{\text{T}} + \frac{G_{\text{п}}}{3600} + \frac{V_{\text{пр}}^{\varphi}}{\rho_{\text{пр.0}}} \quad (3.63)$$

14.7 Расчет массовых долей компонентов газопылевой смеси, кг/с (3.64-3.67)

$$y_{\text{T}}^m = \frac{G_{\text{T}}}{G_{\Sigma}} \quad (3.64)$$

$$y_{\text{в}}^m = \frac{G_{\text{в}}}{G_{\Sigma}} \quad (3.65)$$

$$y_{\text{пр}}^m = \frac{V_{\text{пр}}^{\varphi}}{\rho_{\text{пр.0}}G_{\Sigma}} \quad (3.66)$$

$$y_{\text{п}}^m = \frac{G_{\text{п}}}{3600G_{\Sigma}} \quad (3.67)$$

14.8 Расчет массовой теплоемкости газопылевой смеси, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$ (3.68)

$$c_{\text{gas}} = c_{\text{T}}^m = \frac{1000c_{\text{T.0}}}{\rho_{\text{T.0}}} y_{\text{T}}^m + c_{\text{п}} y_{\text{п}}^m + c_{\text{пр}}^m y_{\text{пр}}^m + c_{\text{air}}^m y_{\text{в}}^m \quad (3.68)$$

14.9 Расчет коэффициента поглощения при температуре газа без учета пыли (3.69)

$$k'_g = y_{\Sigma}^{\text{mix}} \left(\frac{0.78 + 1.6y_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{mix}}}{\sqrt{y_{\Sigma}^{\text{mix}} l_{\text{ef}}}} - 0.1 \right) (1 - 0.37 \cdot 10^{-3} T_{\Gamma}) \quad (3.69)$$

14.10 Расчет коэффициента поглощения при температуре стенки без учета пыли (3.70)

$$k'_{st} = y_{\Sigma}^{\text{mix}} \left(\frac{0.78 + 1.6y_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{mix}}}{\sqrt{y_{\Sigma}^{\text{mix}} l_{\text{ef}}}} - 0.1 \right) (1 - 0.37 \cdot 10^{-3} T_{st}) \quad (3.70)$$

14.11 Расчет коэффициента поглощения пыли

Для данного шага используется формула из работы [14] (3.71)

$$k_{\pi} = \frac{237 \cdot y_{\pi}^m}{d_{\pi} \rho_{\pi} (T_{\Gamma} + 273)} \quad (3.71)$$

14.12 Расчет коэффициента поглощения при температуре газа с учетом пыли (3.72)

$$k_g = k'_g + k_{\pi} \quad (3.72)$$

14.13 Расчет коэффициента поглощения при температуре стенки с учетом пыли (3.73)

$$k_{st} = k'_{st} + k_{\pi} \quad (3.73)$$

14.14 Расчет степени черноты газа (3.74)

$$\varepsilon_g = 1 - e^{-k_g l_{ef}} \quad (3.74)$$

14.15 Расчет поглощательной способности (3.75)

$$A_g = 1 - e^{-k_{st} l_{ef}} \quad (3.75)$$

14.16 Расчет приведенной степени черноты (3.76)

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \left(\frac{1}{A_g} + \left(\frac{1}{\varepsilon_g} \right) \frac{R_{\Phi}}{D_{\text{ВН}}} \right)^{-1} \quad (3.76)$$

14.17 Расчет теплового потока излучением на данном участке, кВт (3.77)

$$\Delta Q_{\text{л}} = \frac{\varepsilon_{\text{пр}} \sigma_{\text{СВ}}}{1000} \left(\left(\frac{\varepsilon_g}{A_g} \right) T_{\Gamma}^4 - T_{st}^4 \right) \Delta F_{\Phi} \quad (3.77)$$

14.18 Расчет накопленного теплового потока излучением, кВт (3.78)

$$Q_{\text{л}} = Q_{\text{л}} + \Delta Q_{\text{л}} \quad (3.78)$$

14.20 Расчет парциального давления трехатомных газов, кПа (3.79, 3.80)

$$p_{CO_2} = p_{gas} y_{CO_2}^{mix} \quad (3.79)$$

$$p_{H_2O} = p_{gas} y_{H_2O}^{mix} \quad (3.80)$$

14.19 Расчет потерей теплоты на диссоциацию трехатомных газов, кДж/кг (3.81)

$$Q_{diss} = \frac{Q_{CO_2} V_{CO_2} \alpha_{CO_2}(T_{\Gamma}, p_{CO_2}) + Q_{H_2O} V_{H_2O} \alpha_{H_2O}(T_{\Gamma}, p_{H_2O})}{\rho_{\text{пр.0}}} \quad (3.81)$$

14.20 Расчет энтальпии газовой смеси, кДж/кг (3.82)

$$H_G = \frac{G_0 H_{\Gamma} + G_B H_{air} + Q_H^m (G_0 - G_{\Gamma}) - Q_{\text{л}}}{G_0 + G_B} \quad (3.82)$$

14.21 Расчет новой температуры газа, °C (3.83)

$$T_{\Gamma} = \frac{H_G + Q_{diss}}{c_{gas}} \quad (3.83)$$

Шаг 15 – Проверка достигнута ли сходимость по температуре газа

Выполняется ли условие (3.84):

$$|T_{\Gamma, new} - T_{\Gamma}| < tol \quad (3.84)$$

Если условие выполняется, то алгоритм переходит к шагу расчета 16, если не выполняется, то рассчитанная новая температура принимается за начальную, а к счётчику итераций по температуре добавляется единица и алгоритм возвращается к шагу 13.

Шаг 16 – Расчёт новой плотности газа

16.1 Расчет плотности при текущей температуре, кг/м³ (3.85)

$$\rho_g = \rho_{g,0} \frac{273}{T_g} \quad (3.85)$$

16.2 Расчет новой плотности, кг/м³ (3.86)

$$\rho_{cp} = \frac{\rho_{prev} + \rho_{cp}}{2} \quad (3.86)$$

Шаг 17 – Проверка достигнута ли сходимости по плотности

Выполняется ли условие (3.87):

$$|\rho_{cp} - \rho_{prev}| < tol2 \quad (3.87)$$

Если условие выполняется, то алгоритм переходит к шагу расчета 18, если не выполняется, то расчёт новая плотность принимается за начальную, а к счётчику итераций по плотности добавляется единица и алгоритм возвращается к шагу 10.

Шаг 18 – Проверка увлечён ли струей весь воздух, подающийся в печь

Выполняется ли условие (3.88):

$$G_T < G_{T.min} \quad (3.88)$$

Если условие выполняется, то флаг режима горения переходит в состояние «afterburn». Если же данное значение ещё не достигнуто, то остается в режиме jet. В обоих случаях алгоритм возвращается к шагу 4.

Шаг 19 – Расчёт геометрии факела

В отличии от шага 11 в режиме afterburn струя уже не увлекает новый воздух, поэтому многие параметры принимаются равными последнему осевому значению в режиме jet:

- усредненная плотность ρ_{cp} – последняя из режима «jet»;
- расстояние до полюса струи x_0 – последняя из режима «jet»;
- длина факела l_ϕ – последняя из режима «jet»;
- $H_c = H_G$ энтальпия в последнем сечении струйного участка далее участвует в расчете как H_c ;
- $G_{Tc} = G_T$ массовый расход несгоревшего топлива в последнем сечении струйного участка далее участвует в расчете как G_{Tc} ;
- $Q_{лс} = Q_l$ накопленный тепловой поток излучением в последнем сечении струйного участка далее участвует в расчете как $Q_{лс}$.

Шаги 19.1 – 19.3 полностью повторяют шаги 3.4 – 3.6

Шаги 19.4 – 19.7 полностью повторяют шаги 11.8 – 11.11

Шаг 20 – Принимаем температуру газа на текущем участке равной температуре газа на прошлом участке**Шаг 21 – Проверка достигнута ли максимальная итерация по температуре**

Выполняется ли условие (3.57):

$$j < j_{max} \quad (3.57)$$

Если условие выполняется, то алгоритм переходит к шагу расчета 22, если не выполняется, то расчёт прекращается с сообщением об ошибке расчёта.

Шаг 22 – Расчёт новой температуры газа

Шаги 22.1 – 22.19 полностью повторяют шаги 14.1 – 14.19

22.20 Расчет энтальпии газовой смеси, кДж/кг (3.89)

$$H_G = H_c + \frac{Q_H^m(G_{Tc}-G_T)-Q_{лс}}{G_0+G_B} \quad (3.89)$$

где H_c – энтальпия в последнем сечении струйного участка, кДж/кг,

Q_H^m – низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг,

G_{Tc} – массовый расход несгоревшего топлива в последнем сечении струйного участка, кг/с,

G_T – расход несгоревшего топлива, кг/с,

G_B – расход воздуха, кг/с,

$Q_{лс}$ – накопленный тепловой поток излучением в последнем сечении струйного участка, кВт.

Шаг 22.21 полностью повторяет шаг 14.21

Шаг 23 – Проверка достигнута ли сходимость по температуре газа

Выполняется ли условие (3.90):

$$|T_{г.new} - T_г| < tol \quad (3.90)$$

Если условие выполняется, то алгоритм переходит к шагу расчета 2, если не выполняется, то рассчитанная новая температура принимается за начальную, а к счётчику итераций по температуре добавляется единица и алгоритм возвращается к шагу 21.

Шаг 24 – Расчёт новой плотности газа

Шаги 24.1-24.2 полностью повторяют шаги 16.1-16.2

24.3 Алгоритм возвращается к шагу 4.

Результатом расчета является температурный профиль газа в факеле, количество и состав продуктов сгорания, а также профиль несгоревшего топлива по длине печи (рисунок 3.15, рисунок 3.16).

Используемое решение для моделирования факела не позволяет учитывать конструкцию горелочного устройства, поэтому при использовании данной модели на реальном объекте целесообразно будет введение режимного коэффициента, который корректирует расстояние до полюса струи (3.91). В работе [58] значение данного коэффициента составляло 0.7.

$$x_0 = k_{\phi} x_0 \quad (3.91)$$

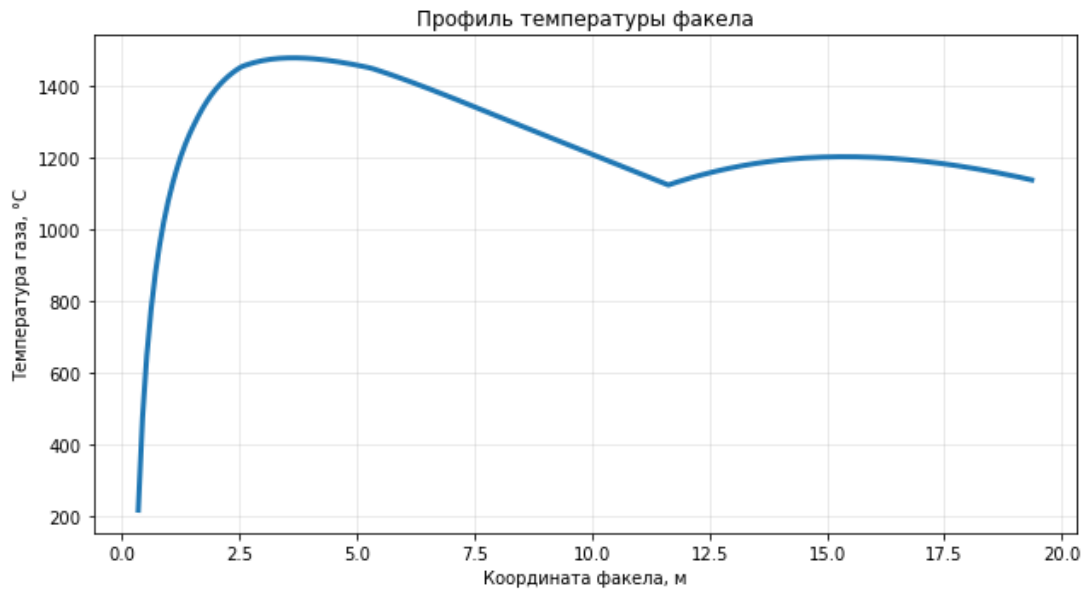


Рисунок 3.15 – Профиль температуры факела по результатам расчета модели
(составлено автором)

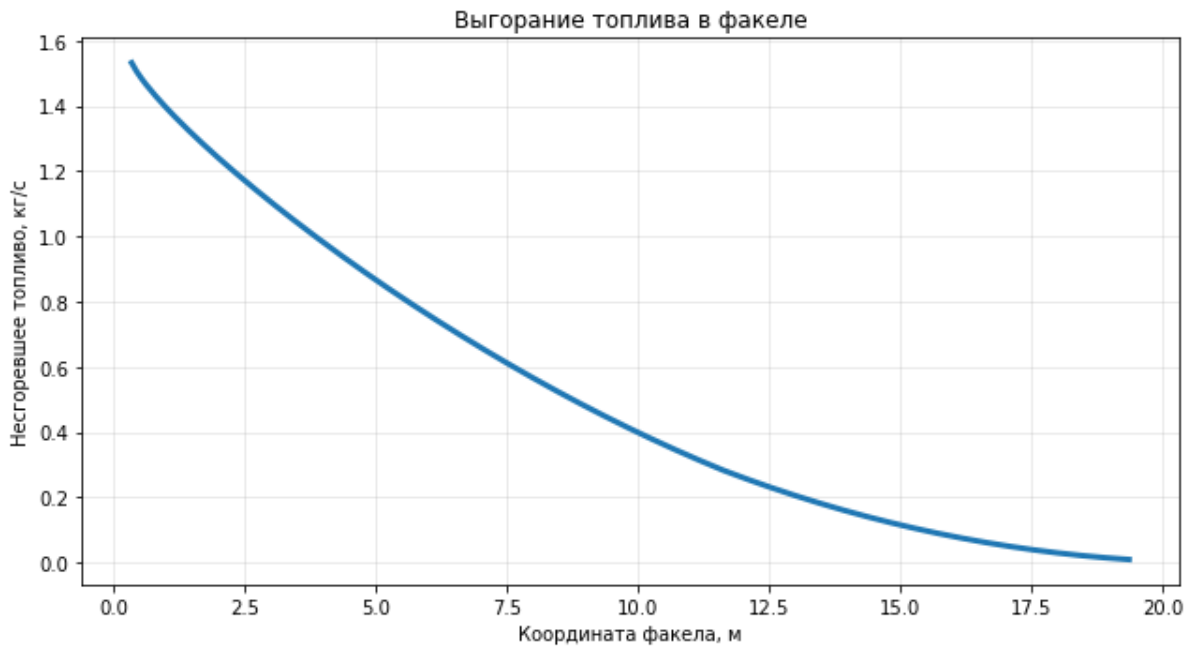


Рисунок 3.16 – Профиль несгоревшего топлива по результатам расчета модели
(составлено автором)

При использовании на промышленной печи данный коэффициент необходимо подбирать, таким образом, чтобы профили температуры и несгоревшего топлива наиболее точно описывали реальный процесс в рассматриваемой печи. В данной работе предложено использовать данный коэффициент в контексте системы управления. В частности, на рассматриваемом предприятии используется горелка типа ВРГ, которая имеет три параметра: положения дросселя, положение лопаток завихрителя и положение горелки. Каждый из этих параметров можно представить в виде набора дискретных значений, соответственно комбинации значений эти параметров можно

связать со значением коэффициента k_{ϕ} . Такой подход позволит использовать рассмотренную аналитическую модель факела в управлении, так как таким образом она будет связана с управляющими органами доступными оператору. Данный вопрос более подробно освещается в четвертой главе.

3.5 Модель цепной зоны

Предложенный алгоритм расчёта [59] основывается на математических моделях цементных печей опубликованных в [58]. Рассматриваемый алгоритм учитывает отличия в подаче пыли, а также связывает расчёт теплообмена в цепной зоне с подмоделью осевого движения [64] и пылеуноса [66]. Также в сравнении с работой [58] изменены формулы расчёта теплообмена и движения газа в цепной зоне на формулы из работы [1], которые были получены и верифицированы печах ПГЗ для спекания нефелинового концентрата и позволяют учесть в теплообмене характеристики навески цепей при теплообмене. Кроме того, в представленном алгоритме подробно описаны методы итеративного решения системы уравнений модели и приведены рекомендации по выбору оптимальных значений расчётных параметров.

Разработанный алгоритм расчёта цепной зоны вращающейся печи реализует последовательное моделирование теплового и материального балансов с учётом теплообмена между газом, материалом, пылью и футеровкой. На первом этапе определяется состав сырья и продуктов горения, расход воздуха и газов, а также содержание влаги и углекислого газа, выделяющихся в процессе нагрева. Далее рассчитываются массовые и объёмные расходы компонентов, а также состав газовой смеси на входе и выходе зоны.

Затем выполняется энергетический баланс, включающий определение энтальпии материала, газов и пыли при заданных температурах. На основе этого вычисляются тепловые потоки, потери в окружающую среду и количество теплоты, необходимое для нагрева и испарения влаги. Внутренний итерационный цикл определяет температуру газа на входе из условия равенства энтальпий притока и оттока.

После получения температурного поля определяется среднелогарифмический температурный напор, средние температуры газа и материала, а также геометрические и аэродинамические параметры зоны — скорость газового потока, степень заполнения, число Рейнольдса и Нуссельта. На их основе рассчитывается коэффициент теплоотдачи, параметры цепной навески и площадь футеровки.

Итерационный цикл верхнего уровня выполняет подбор температуры материала и остаточной влажности на выходе из зоны так, чтобы рассчитанная длина цепной завесы совпадала с заданной. При этом после каждой итерации обновляются параметры теплообмена, температуры стенок и коэффициенты теплопередачи до достижения сходимости.

Рассмотрим общий алгоритм расчёта модели на рисунке 3.17, алгоритм определения длины зоны вынесен в отдельный рисунок 3.16. Входные данные представлены в таблице 3.13-3.16.

Шаг 1 – Ввод данных

Таблица 3.13 – Параметры печи (по данным автора)

Обозначение	Описание	Значение	Единицы измерения	Источник
$D_{\text{внеш}}$	Внешний диаметр кожуха печи	3.6	м	[1]
$D_{\text{вн}}$	Внутренний диаметр кожуха печи	3.4	м	[1]
$s_{\text{ф}}$	Толщина футеровки печи	0.1	м	[1]
L_s	Длина от начала печи до начала цепной зоны	3.6	м	[1]
$\frac{F_c}{F_{ca}}$	Плотность навески цепей в зоне	3.7	-	[1]
$L_{\text{ц}}$	Протяженность цепной зоны	23.4	м	[1]
S_1	Поперечный шаг гирлянды цепи	1.32	м	[1]
S_2	Продольный шаг гирлянды цепи	2	м	[1]
$l_{\text{ц}}$	Длина цепи	4.5	м	[1]
$d_{\text{ц}}$	Диаметр звена цепи	0.025	м	[1]
n	Скорость вращения печи	1.8	об/мин	[1]
$G_{\text{спек}}$	Производительность печи по спеку	39 000	кг/ч	[1]
α	Угол наклона печи	2.3	градус	[1]
l_2	Продольный шаг навески	1	м	[1]
$T_{\text{ос}}$	Температура окружающей среды	20	°С	-

Известно, что по длине диаметр может изменяться из-за образования обмазки и колец внутри печи. Однако предполагается, что для рассматриваемого случая цепной зоны нефелиновых печей образование каких-либо устойчивых отложений на стенках не свойственно и поэтому не учитывается при расчёте диаметра.

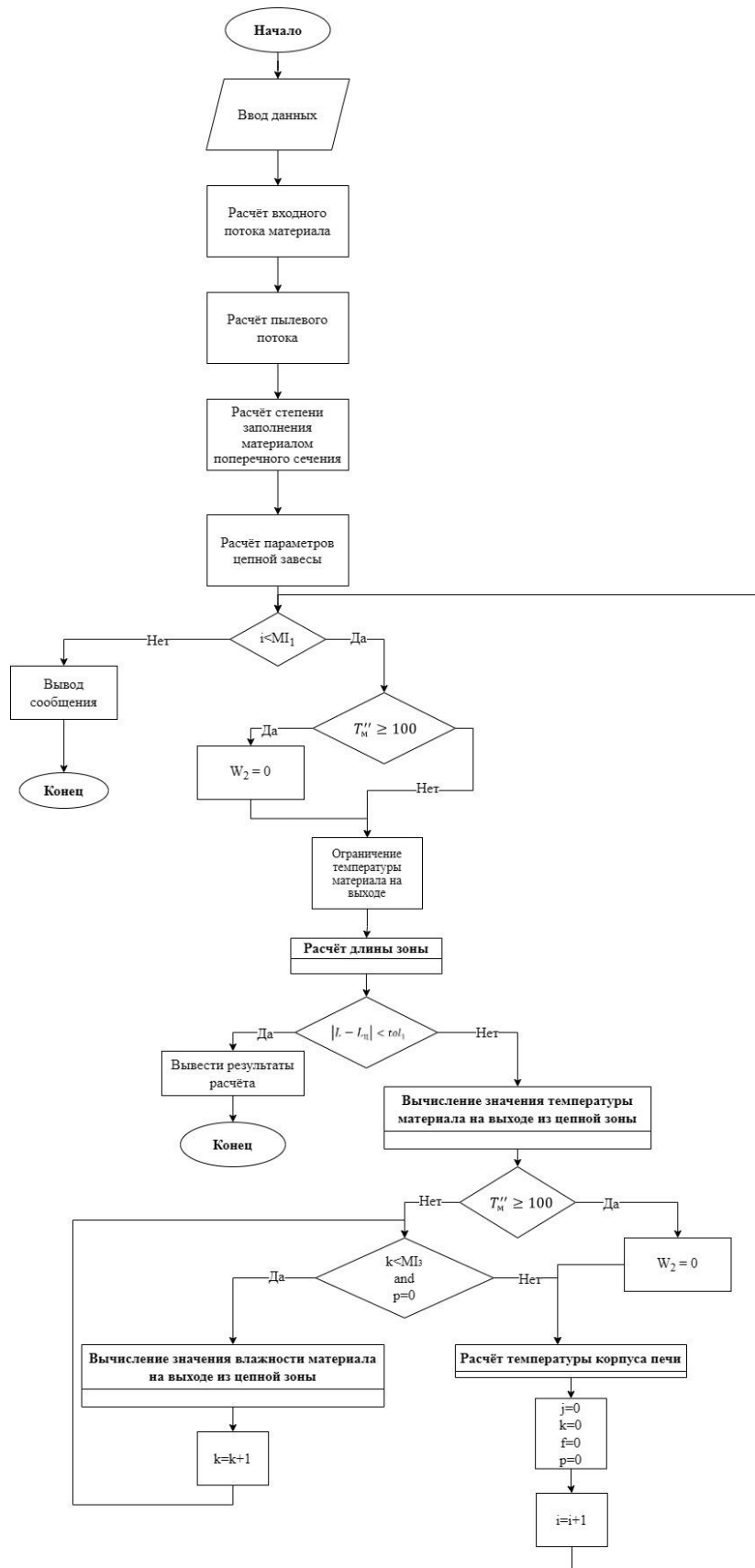


Рисунок 3.17 – Алгоритм расчёта модели цепной зоны трубчатой вращающейся печи для спекания нефелинового концентрата с известняком (составлено автором)

Таблица 3.14 – Параметры материальных потоков (по данным автора)

№	Обозначение	Описание	Значение	Единицы измерения	Источник
Материал на входе в зону					
1	T'_M	Температура материала на входе в зону	46	°С	[1]
2	$G_{\text{сх. шихта}}$	Расход сухой шихты	53960	кг/ч	[1]
3	W_1	Влажность шихты	29	%	[1]
4	PPP	Массовая доля потерь при прокатке в исходной сухой шихте	26.8	%	[1]
5	Al_2O_3'	Массовая доля Al_2O_3 в исходной сухой шихте	11.6	%	[1]
6	Na_2O'	Массовая доля Na_2O в исходной сухой шихте	7.2	%	[1]
7	CaO'	Массовая доля CaO в исходной сухой шихте	32.7	%	[1]
8	SiO_2'	Массовая доля SiO_2 в исходной сухой шихте	17.7	%	[1]
9	Fe_2O_3'	Массовая доля Fe_2O_3 в исходной сухой шихте	1.6	%	[1]
10	CO_2'	Массовая доля CO_2 в исходной сухой шихте	26	%	[1]
11	$CaCO_3'$	Массовая доля $CaCO_3$ в исходной сухой шихте	58.7	%	[1]
12	$Неп'$	Массовая доля нефелина в исходной сухой шихте	32.3	%	Из молярного соотношения
13	h	Высота слоя материала	0.7	м	Рассчитывается из подмодели движения материала
Газ на выходе из зоны					
14	$T''_Г$	Температура газа на выходе из зоны	180	°С	[1]
16	[1]	Массовые расход топлива	4430	кг/час	
Пыль					
17	$Неп^П$	Массовая доля нефелина в составе пыли	50.5	%	[36]
18	$CaCO_3^П$	Массовая доля $CaCO_3$ в составе пыли	49	%	[36]
19	f_u^0	Процент пыли от общего пылевыноса, который уносится из цепной зоны	60	%	[1] [36]
20	f_r^0	Процент пыли от общего пылевозврата, который оседает в цепной зоне	40	%	[1]

Продолжение Таблицы 3.14

№	Обозначение	Описание	Значение	Единицы измерения	Источник
Пыль					
21	$G_{\text{п}}$	Общий пылеунос	14000	кг/ч	[3][1]
22	$G_{\text{п,воз}}$	Общий пылевозврат	13000	кг/ч	[1]

Высота слоя материала рассчитывается в отдельной подмодели осевого движения материала вдоль печи.

Таблица 3.15 – Константы и справочные данные (по данным автора)

№	Обозначение	Описание	Значение	Единицы измерения	Источник
1	ε	Степень черноты корпуса печи	0.95	-	[22]
Энтальпия					
2	H_{CaCO_3}	Расчёт энтальпии осуществлялся по уравнению теплосодержания		кДж/кг	[22]
3	H_{CO_2}				
4	$H_{Fe_2O_3}$				
5	H_{H_2O-liq}				
6	H_{H_2O-vap}				
7	H_{O_2}				
8	H_{N_2}				
9	$H_{\text{пер}}$	Расчёт энтальпии осуществляется через удельную теплоёмкость при различных температурах	Таблица Б.7	кДж/кг	[13]
Плотность					
10	ρ_{CO_2}	Плотность газов при атмосферном давлении и различной температуре	Таблица Б.3	кг/м ³	[100]
11	ρ_{O_2}				
12	ρ_{N_2}				
13	ρ_{H_2O}				[95]
Динамическая вязкость					
14	μ_{CO_2}	Динамическая вязкость при атмосферном давлении и различной температуре	Таблица Б.4	Па·с	[100]
15	μ_{O_2}				
16	μ_{N_2}				
17	μ_{H_2O}				[90]
Теплопроводность					
18	λ_{CO_2}	Теплопроводность при атмосферном давлении и различной температуре	Таблица Б.2	Вт/(м·К)	[24]
19	λ_{O_2}				
20	λ_{N_2}				
21	λ_{H_2O}				

Параметры расчёта

Таблица 3.16 – Параметры печи (по данным автора)

Обозначение	Описание	Значение	Единицы измерения
tol_1	Критерий завершения итераций при вычислении длины цепной зоны	0.0001	-
MI_1	Максимальное число итераций основного цикла по температуре материала на выходе из цепной	200	-
i	Счётчик итераций основного цикла по температуре материала на выходе из цепной зоны	0	-
z_1	Шаг численного дифференцирования по температуре. Используется при численном вычислении производной изменения длины цепной зоны по температуре материала на выходе	0.01	-
tol_2	Критерий сходимости итераций по уточнению температуры газового потока	0.001	-
MI_2	Максимальное число итераций по температуре газа	50	-
j	Счётчик итераций по температуре газа	0	-
a	Нижняя граница интервала при вычислении температуры газа на входе в цепную зону методом Брента	0	°C
b	Верхняя граница интервала при вычислении температуры газа на входе в цепную зону методом Брента	2000	°C
z_3	Шаг численного дифференцирования по влажности. Используется при численном вычислении производной изменения длины зоны по влажности материала на выходе из цепной зоны	0.01	-
MI_3	Максимальное число итераций по влажности материала на выходе из цепной зоны	200	-
k	Счётчик итераций по влажности материала на выходе из цепной зоны	0	-
p	Флаг, который может быть нулем и единицей, сигнализирующий о том, что длина цепной зоны становится нечувствительной к изменению влажности	0	-
K_{rel}	Коэффициент релаксации при корректировке влажности	0.5	-
T''_m	Начальное приближение температуры материала на выходе	96	°C
W_2	Начальное приближение остаточной влажности материала	7	%

Продолжение Таблицы 3.16

Обозначение	Описание	Значение	Единицы измерения
W_2	Начальное приближение остаточной влажности материала	7	%
$T'_Г$	Начальное приближение температуры газа на входе в зону	$T''_Г$	°С
$T_к$	Начальное приближение температуры корпуса в зоне цепей	100	°С
tol_4	Критерий сходимости итераций по уточнению температуры корпуса печи	0.5	-
MI_4	Максимальное число итераций по температуре корпуса печи	50	-
f	Счётчик итераций по температуре корпуса печи	0	-

Шаг 2 – Расчёт входного потока материала

2.1 Расход влажной шихты на входе в цепную зону, кг/ч (3.92)

$$G'_w = \frac{G_{\text{сх. шихта}}}{(100 - W_1)} \cdot 100 \quad (3.92)$$

2.2 Удельный расход влажной шихты до зоны цепей, кг/кг спек (3.93).

$$G'_{ud} = \frac{G'_w}{G_{\text{спек}}} \quad (3.93)$$

2.3 Масса компонентов в шихте до зоны цепей, кг/ч.

Для Al_2O_3 , Na_2O , CaO , SiO_2 , Fe_2O_3 , CO_2 , $CaCO_3$, Nep рассчитывается по формуле 3.94:

$$G'_{\text{Соед.}} = \frac{G_{\text{сх. шихта}} \cdot \text{Соед.}'}{100}, \quad (3.94)$$

где Соед.' – это массовая доля соответствующего компонента шихты из таблицы. При этом для воды расчёт выполняется по следующей формуле 3.95:

$$G'_{H_2O} = \frac{G_{\text{сх. шихта}}}{(100 - W_1)} 100 - G_{\text{сх. шихта}} \quad (3.95)$$

2.4 Удельная масса компонентов шихты до зоны цепей, кг/кг.спек.

Для Al_2O_3 , Na_2O , CaO , SiO_2 , Fe_2O_3 , CO_2 , $CaCO_3$, Nep , H_2O рассчитывается по формуле 3.96:

$$M'_{\text{Соед.}} = \frac{G'_{\text{Соед.}} \cdot G'_{ud}}{G'_w} \quad (3.96)$$

При этом для связанной воды расчёт выполняется по следующей формуле 3.97:

$$M'_{H_2Osv} = \frac{(G_{PP} - G_{CO_2}) G'_{ud}}{G'_w} \quad (3.97)$$

Шаг 3 – Расчёт пылевого потока

3.1 Удельный расход пыли на входе (3.98) и выходе (3.99) зоны, кг/кг спек.

$$G^0_{ud \text{ п.вх}} = \frac{G^0_{\text{п.вх}}}{G_{\text{спек}}} \quad (3.98)$$

$$G^0_{ud \text{ п.вых}} = \frac{G^0_{\text{п.вых}}}{G_{\text{спек}}} \quad (3.99)$$

3.2 Массовая доля компонентов в возвращаемой пыли, %

Вычисляется из молярного соотношения химических элементов (3.100-3.105).

$$Al_2O_3^{\Pi} = 0.359Nep^{\Pi} \quad (3.100)$$

$$Na_2O^{\Pi} = 0.218Nep^{\Pi} \quad (3.101)$$

$$SiO^{\Pi} = 0.423Nep^{\Pi} \quad (3.102)$$

$$CaO^{\Pi} = 0.56CaCO_3^{\Pi} \quad (3.103)$$

$$CO_2^{\Pi} = 0.44CaCO_3^{\Pi} \quad (3.104)$$

$$PPP^{\Pi} = 0.44CaCO_3^{\Pi} \quad (3.105)$$

3.3 Удельная масса компонентов пыли в воздушном потоке до и после зоны цепей, кг/кг.спек.

Для Al_2O_3 , Na_2O , CaO , SiO_2 , Fe_2O_3 , CO_2 , $CaCO_3$, Nep масса компонентов пыли в воздушном потоке до цепной зоны рассчитывается по формуле (3.106):

$$D'_{\text{Соед.}} = \frac{G_{\text{уд п.вх}}^0 \text{Соед.}^{\Pi}}{100} \quad (3.106)$$

Для Al_2O_3 , Na_2O , CaO , SiO_2 , Fe_2O_3 , CO_2 , $CaCO_3$, Nep масса компонентов пыли в воздушном потоке после цепной зоны рассчитывается по формуле (3.107):

$$D''_{\text{Соед.}} = \frac{G_{\text{уд п.вых}}^0 \text{Соед.}^{\Pi}}{100} \quad (3.107)$$

3.4 Удельная масса компонентов пыли, меняющих массу материала в пастели в цепной зоне, кг/кг.спек.

Для Al_2O_3 , Na_2O , CaO , SiO_2 , Fe_2O_3 , CO_2 , $CaCO_3$, Nep рассчитывается по формуле 3.108:

$$D'''_{\text{Соед.}} = \frac{\Delta G^0 \text{Соед.}^{\Pi}}{100G_{\text{спек}}}, \quad (3.108)$$

где ΔG^0 – это изменение массы материала в зоне цепей из-за осаждения пыли, рассчитывается в модели пылеуноса и пылевыноса.

Шаг 4 – Расчёт степени заполнения материалом поперечного сечения

4.1 Внутренний радиус печи, м (3.109)

$$R = \frac{D_{\text{внут}}}{2} \quad (3.109)$$

4.2 Половина центрального угла, рад (3.110)

$$\theta = \arccos\left(\frac{R-h}{R}\right) \quad (3.110)$$

4.3 Площадь сегмента, занимаемого материалом, м²(3.111)

$$F_M = R^2\theta - (R-h)\sqrt{2Rh-h^2} \quad (3.111)$$

4.4 Площадь полного сечения, м²

$$F_C = \pi R^2 \quad (3.112)$$

4.5 Степень заполнения, % (3.113)

$$Z = \frac{100F_M}{F_C} \quad (3.113)$$

Шаг 5 – Расчёт параметров цепной завесы

5.1 – Центральный угол гирлянды, градусы (3.114)

$$\gamma_{ц} = \frac{S_1}{360\pi D_{внут.}} \quad (3.114)$$

5.2 – Стрела прогиба гирлянды, м (3.115)

$$H_{ц} = 0.5 \sqrt{l_{ц}^2 - S_2^2 - D_{вн.}^2 \cdot \sin^2\left(\frac{\gamma_{ц}}{2}\right)} \quad (3.115)$$

5.3 – Коэффициент гирляндной навески (3.116)

$$K_{г} = 0.34 \left(\frac{H_{ц}}{D_{вн.}}\right)^{-0.5} \quad (3.116)$$

Шаг 6 – Проверка того, что программа не достигла максимального количества итераций расчёта

На данном шаге выполняется сравнение номера текущей итерации i со значением MI_1 . Если номер текущей итерации равен и больше максимального значения, то расчёт останавливается – алгоритм выводит сообщение о том, что достичь решения не удалось за поставленное количество итераций. Если номер же номер меньше, то выполняется шаг 5.

Шаг 7 – Проверка того, что текущее значение температуры материала на выходе из цепной зоны больше ста градусов

Если $T''_m \geq 100$, то значение влажности материала на выходе из цепной зоны становится равно 0. Если же значение температуры материала меньше ста градусов, то текущая влажность материала на выходе из зоны не изменяется.

Шаг 8 – Ограничение температуры материала на выходе

На данном шаге устанавливаются физические ограничения для температуры материала на выходе из цепной зоны. При расчёте температура материала не может быть ниже окружающей температуры и выше температуры нагревающего его газа.

Внутренний блок 1 – Расчёт длины зоны

Шаги с 9 по 27 для удобства отображения вынесены в отдельный блок расчёта (рисунок 3.18).

Шаг 9 – Расчёт выходного потока материала без учёта пыли

9.1 Расход влажной шихты на выходе из цепной зоны, кг/ч (3.117)

$$G''_w = \frac{G_{сх. шихта}}{(100 - W_2)} \cdot 100 \quad (3.117)$$

9.2 Удельный расход влажной шихты после зоны цепей, кг/кг спек (3.118)

$$G''_{уд} = \frac{G''_w}{G_{спек}} \quad (3.118)$$

9.3 Масса компонентов в шихте после зоны цепей, кг/ч (3.119).

$$G''_{соед.} = G'_{соед.} \quad (3.119)$$

При этом для воды расчёт выполняется по следующей формуле (3.120):

$$G''_{H_2O} = \frac{G_{\text{сх. шихта}}}{(100 - W_2)} 100 - G_{\text{сх. шихта}} \quad (3.120)$$

9.4 Удельная масса компонентов шихты после зоны цепей (без учёта пыли), кг/кг.кл.

Для Al_2O_3 , Na_2O , CaO , SiO_2 , Fe_2O_3 , CO_2 , $CaCO_3$, Ner , H_2O рассчитывается по формуле (3.121):

$$M''_{\text{Соед.}} = \frac{G''_{\text{Соед.}} G''_{ud}}{G''_w} \quad (3.121)$$

При этом для связанной воды расчёт выполняется по следующей формуле (3.122):

$$M''_{H_2Osv} = \frac{(G''_{PPP} - G''_{CO_2}) G''_{ud}}{G''_w} \quad (3.122)$$

Шаг 10 – Расчёт расхода газового потока до и после цепной зоны

10.1 Количество паров H_2O образующихся от испарения всей влаги шихты, $m^3/\text{час}$ (3.123)

$$V_{H_2O} = \frac{G'_{H_2O}}{\rho_{H_2O}} \quad (3.123)$$

10.2 Количество паров H_2O образующихся от испарения влаги в зоне цепей, $m^3/\text{час}$ (3.124)

$$V_{H_2O}^{цз} = \frac{G'_{H_2O} - G''_{H_2O}}{\rho_{H_2O}} \quad (3.124)$$

10.3 Количество паров H_2O образующихся от испарения влаги после зоны цепей, $m^3/\text{час}$ (3.125)

$$V_{H_2O}^{оп} = V_{H_2O} - V_{H_2O}^{цз} \quad (3.125)$$

10.4 Количество паров H_2O образующихся от испарения связанной влаги шихты, $m^3/\text{час}$ (3.126)

$$V_{H_2O}^{св} = \frac{G_{\text{сх. шихта}} (PPP' - CO_2')}{100 \rho_{H_2O}} \quad (3.126)$$

10.5 Количество CO_2 выделившееся из шихты при обжиге, $m^3/\text{час}$ (3.127)

$$V_{CO_2}^{ш} = \frac{G_{\text{сх. шихта}} CO_2'}{100 \rho_{CO_2}} \quad (3.127)$$

10.11 Удельная масса компонентов газовой смеси до зоны цепей, $m^3/\text{кг.спек}$ (3.128-3.130)

$$Gas'_{H_2O} = \frac{(V_{H_2O}^{оп} + V_{H_2O}^{св} + V_{H_2O})}{G_{\text{спек}}} \quad (3.128)$$

$$Gas'_{CO_2} = \frac{(V_{CO_2}^{ш} + V_{CO_2})}{G_{\text{спек}}} \quad (3.129)$$

$$Gas'_{comp} = \frac{V_{comp}}{G_{\text{спек}}} \quad (3.130)$$

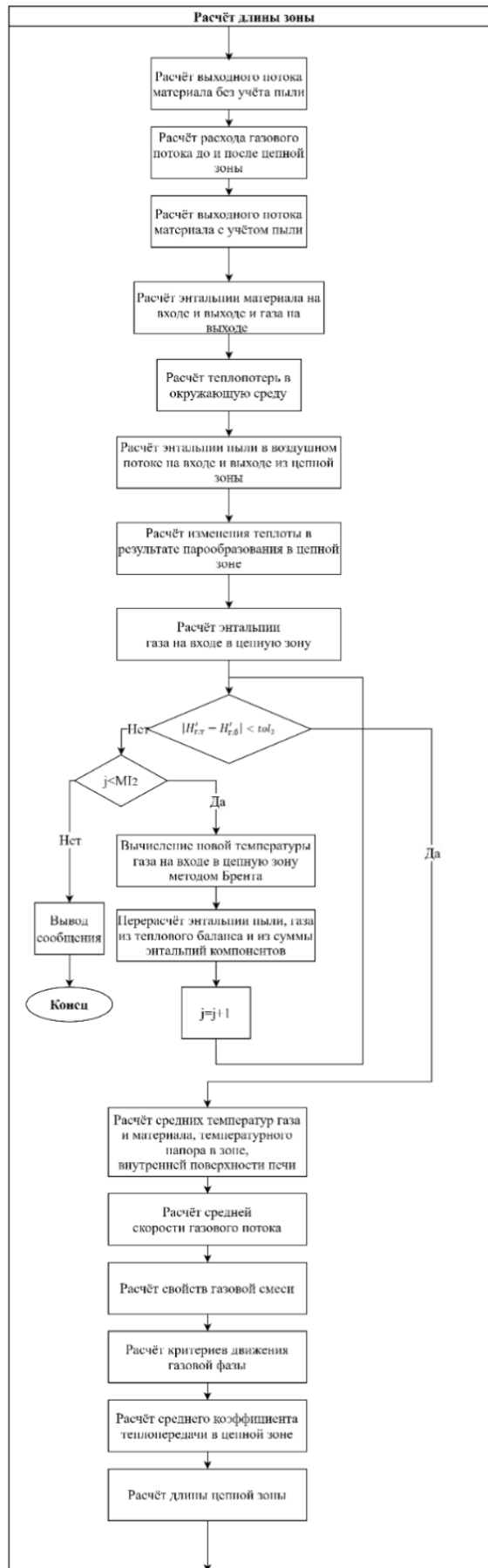


Рисунок 3.18 – Внутренний блок 1 «Расчёт длины цепной зоны» (составлено автором)

10.12 Удельная масса компонентов газовой смеси после зоны цепей, $\text{м}^3/\text{кг. спек}$ (3.131)

$$Gas''_{H_2O} = \frac{(V_{H_2O}^{оп} + V_{H_2O}^{сб} + V_{H_2O}^{ш})}{G_{кл}} \quad (3.131)$$

Для других компонентов (3.132):

$$Gas''_{comp} = Gas'_{comp} \quad (3.132)$$

10.13 Расход газового потока до и после цепной зоны м³/кг. спек

$$V_{in} = V_{H_2O}^{оп} + V_{H_2O}^{сб} + V_{CO_2}^{ш} + V_{гор} \quad (3.133)$$

$$V_{out} = V_{in} + V_{H_2O}^{ш} \quad (3.134)$$

где $V_{гор}$ – Расход газового потока от горения м³/кг. спек, который вычисляется в модели факела.

Шаг 11 – Расчёт выходного потока материала с учётом пыли

11.1 Удельная масса компонентов шихты после зоны цепей (без учёта пыли), кг/кг.спек.

Для Al_2O_3 , Na_2O , CaO , SiO_2 , Fe_2O_3 , CO_2 , $CaCO_3$, Nep рассчитывается по формуле (3.135):

$$M'''_{Соед.} = M''_{Соед.} + D'''_{Соед.} \quad (3.135)$$

Для H_2O масса при добавлении или уносе пыли не изменяется (3.36).

$$M'''_{H_2O} = M''_{H_2O} \quad (3.136)$$

11.2 Удельный расход влажной шихты после зоны цепей, кг/кг спек (3.137).

Рассчитывается по сумме следующих компонентов Al_2O_3 , Na_2O , CaO , SiO_2 , Fe_2O_3 , CO_2 , H_2O

$$G'''_{уд} = \sum M'''_{Соед.} \quad (3.137)$$

Шаг 12 – Расчёт энтальпии материала на входе и выходе и газа на выходе

12.1 Расчёт суммарной энтальпии материала до цепной зоны, кДж/кг спек.

Рассчитывается как сумма энтальпии компонентов Fe_2O_3 , $CaCO_3$, Nep , H_2O , H_2Osv (3.138).

$$H'_M = \sum H_{Соед.}^{T'_M} M'_{Соед.} \quad (3.138)$$

12.2 Расчёт суммарной энтальпии материала после цепной зоны, кДж/кг спек.

Рассчитывается как сумма энтальпии компонентов Fe_2O_3 , $CaCO_3$, Nep , H_2O , H_2Osv (3.139).

$$H'''_M = \sum H_{Соед.}^{T'''_M} M'''_{Соед.} \quad (3.139)$$

12.3 Расчёт суммарной энтальпии газа после цепной зоны, кДж/кг спек.

Рассчитывается как сумма энтальпии компонентов H_2O , CO_2 , N_2 , O_2 (3.140)

$$H''_Г = \sum H_{Соед.}^{T''_Г} Gas'_{Соед.} \quad (3.140)$$

Шаг 13 – Расчёт теплотерьер в окружающую среду

13.1 Расчёт теплового потока в окружающую среду на квадратный метр поверхности цепной зоны, Вт/м

Формула для расчёта теплового потока в окружающую среду при отсутствии ветра была приведена в [22] (3.141).

$$q_{oc} = 5.67 \varepsilon_k \left(\left(\frac{T_k}{100} + 2.73 \right)^4 - \left(\frac{T_{oc}}{100} + 2.73 \right)^4 \right) + 7.7(1 + 0.001T_k)(T_k - T_{oc}) \quad (3.141)$$

13.2 Расчёт удельных потерь теплоты в окружающую среду кДж/кг кл (3.142).

Для первой итерации берётся известное значение длины цепной зоны, для всех последующих – рассчитанное в предыдущей итерации.

$$Q_{oc} = \frac{3600 q_{oc} L_c}{G_{спек}} \quad (3.142)$$

Шаг 14 – Расчёт энтальпии пыли в воздушном потоке на входе и выходе из цепной зоны

14.1 Расчёт суммарной энтальпии пыли в газовом потоке до цепной зоны, кДж/кг спек.

Рассчитывается как сумма энтальпии компонентов $CaCO_3$, Nep (3.143).

$$H'_п = \sum H'_{Соед.} T'_r D'_{Соед.} \quad (3.143)$$

14.2 Расчёт суммарной энтальпии пыли в газовом потоке после цепной зоны, кДж/кг спек.

Рассчитывается как сумма энтальпии компонентов $CaCO_3$, Nep (3.144)

$$H''_п = \sum H''_{Соед.} T''_r D''_{Соед.} \quad (3.144)$$

Шаг 15 – Расчёт изменения теплоты в результате парообразования в цепной зоне

15.1 Расчёт испарившейся влаги в цепной зоне, кг/кг.спек (3.145).

$$\Delta M_{H_2O} = M'_{H_2O} - M'''_{H_2O} \quad (3.145)$$

15.2 Расчёт изменения теплоты, кДж/кг спек (3.146).

Удельная теплота парообразования 2257, кДж/кг

$$Q_{H_2O} = \Delta M_{H_2O} \cdot 2257 \quad (3.146)$$

Шаг 16 – Расчёт энтальпии газа на входе в цепную зону

16.1 Расчёт энтальпии газа на входе в цепную зону через тепловой баланс, кДж/кг спек (3.147).

$$H'_{г.б} = H''_г + H'''_м + H''_п - H'_п - H'_м + Q_{oc} + Q_{H_2O} \quad (3.147)$$

16.2 Расчёт энтальпии газа на входе в цепную зону через температуру газа, кДж/кг спек.

Рассчитывается как сумма энтальпии компонентов H_2O , CO_2 , N_2 , O_2 (3.148).

$$H'_{г.т} = \sum H'_{Соед.} T'_r Gas'_{Соед.} \quad (3.148)$$

Шаг 17 – Сравнение энтальпии газа на входе (3.149)

$$|H'_{г.т} - H'_{г.б}| < tol_2 \quad (3.149)$$

Если условие не выполнено, то переходим к шагу 18. Если условие выполнено, то переходим к шагу 22.

Шаг 18 – Проверка того, что программа не достигла максимального количества итераций расчёта

На данном шаге выполняется сравнение номера текущей итерации j со значением MI_2 . Если номер текущей итерации равен и больше максимального значения, то расчёт останавливается – алгоритм выводит сообщение о том, что достичь решения не удалось за поставленное количество итераций. Если номер же номер меньше, то выполняется шаг 19.

Шаг 19 – Вычисление новой температуры газа на входе в цепную зону методом Брента

Если условие не выполнено, то с помощью метода Брента [79] вычисляется новое значение T'_r .

Метод Брента используется для нахождения нуля функции на интервале $[a, b]$, где функция меняет знак. Алгоритм использует адаптивную стратегию, основанную на анализе поведения функции на последних вычисленных шагах.

На каждом итерационном шаге функция вычисляется в нескольких точках, и в зависимости от характера изменения её значений выбирается тип последующего шага.

Если наблюдается устойчивое и монотонное уменьшение модуля функции при приближении к корню, то алгоритм предполагает, что зависимость функции в данной области достаточно гладкая. В этом случае используется интерполяционный шаг: при наличии двух точек выполняется линейная интерполяция (метод секущих), а при наличии трёх точек – обратная квадратичная интерполяция, при которой через три последние значения функции строится парабола, и её пересечение с осью абсцисс принимается за новое приближение корня. Такой подход обеспечивает быстрое уточнение решения и позволяет достичь скорости сходимости, близкой к квадратичной.

Если же интерполяция даёт нестабильный результат – например, шаг выходит за пределы допустимого интервала, не приводит к уменьшению невязки или поведение функции утрачивает монотонность – алгоритм автоматически переходит к методу бисекции. В этом случае рабочий интервал делится пополам, и выбирается та его часть, в которой сохраняется изменение знака функции. Такой переход обеспечивает устойчивость и предотвращает расходимость даже в случае сложных, немонотонных или осциллирующих зависимостей.

Если после этого функция вновь ведёт себя гладко, метод возвращается к интерполяционным шагам.

Шаг 20 – Перерасчёт энтальпии пыли, газа из теплового баланса и из суммы энтальпий компонентов

20.1 Перерасчёт суммарной энтальпии пыли в газовом потоке до цепной зоны при новой температуре T'_r , кДж/кг кл.

Рассчитывается как сумма энтальпии компонентов $CaCO_3$, Nep (3.150)

$$H'_{\Pi} = \sum H'_{\text{Соед.}} D'_{\text{Соед.}} \quad (3.150)$$

20.2 Перерасчёт энтальпии газа на входе в цепную зону через тепловой баланс при новой температуре T'_r , кДж/кг кл (3.151).

$$H'_{r,6} = H'_r + H'''_M + H''_{\Pi} - H'_{\Pi} - H'_M + Q_{oc} + Q_{H_2O} \quad (3.151)$$

20.3 Перерасчёт энтальпии газа на входе в цепную зону через температуру газа при новой температуре T'_r , кДж/кг кл.

Рассчитывается как сумма энтальпии компонентов H_2O, CO_2, N_2, O_2 (3.152)

$$H'_{r,г} = \sum H'_{\text{Соед.}} Gas'_{\text{Соед.}} \quad (3.152)$$

Шаг 21 – Изменение значения счётчика итераций

К счетчику итераций j прибавляется единица и алгоритм возвращается к шагу 17. Так происходит до тех пор, пока не будет верно условие в шаге 17, либо пока значение j не превысит максимальное количество итераций MI_2 . Если будет достигнуто максимальное количество итераций, то расчёт модели должен быть остановлен с ошибкой.

Шаг 22 – Расчёт средних температур газа и материала, температурного напора в зоне, внутренней поверхности печи

22.1 Расчёт среднелогарифмического температурного напора в цепной зоне, °C (3.153)

$$\Delta T = \frac{(T'_r - T'_M) - (T''_r - T''_M)}{\ln\left(\frac{(T'_r - T'_M)}{(T''_r - T''_M)}\right)} \quad (3.153)$$

22.2 Расчёт средней температуры газа и материала в цепной зоне, °C (3.154, 3.155)

$$T_r = \frac{T'_r + T''_r}{2} \quad (3.154)$$

$$T_M = \frac{T'_M + T''_M}{2} \quad (3.155)$$

22.3 Расчёт температуры внутренней поверхности печи в цепной зоне, °C (3.156)

$$T_{st} = \Delta T_M \quad (3.156)$$

Шаг 23 – Расчёт средней скорости газового потока

23.1 Удельная масса компонентов газовой смеси внутри цепной зоны, м³/кг. кл

Рассчитывается для следующих компонентов H_2O, CO_2, N_2, O_2 (3.157)

$$Gas_{\text{Соед.}} = 0.5 Gas'_{CO_2} + 0.5 Gas''_{CO_2} \quad (3.157)$$

23.2 Расчёт суммарного газового потока, м³/кг. кл

Рассчитывается для следующих компонентов H_2O, CO_2, N_2, O_2 (3.158)

$$Gas = \sum Gas_{\text{Соед.}} \quad (3.158)$$

23.3 Расчёт средней скорости газового потока, м/с (3.159)

$$W_r = \frac{400 Gas G_{\text{кл}} \left(1 + \frac{T_r}{273}\right)}{3600 \pi D_{\text{внут.}}^2 (100 - S_M)} \quad (3.159)$$

Шаг 24 – Расчёт свойств газовой смеси

24.1 Расчёт мольных долей компонентов газовой смеси

Рассчитывается для следующих компонентов H_2O , CO_2 , N_2 , O_2 (3.160)

$$x_{\text{Соед.}} = \frac{Gas_{\text{Соед.}}}{Gas} \quad (3.160)$$

24.2 Расчёт коэффициент взаимодействия по формуле Уилке [79]

Рассчитывается для следующих компонентов H_2O , CO_2 , N_2 , O_2 (3.161)

$$\varphi_{\text{Соед.}i \text{ Соед.}j}(T_{\Gamma}) = \frac{\left(1 + \left(\frac{\mu_{\text{Соед.}i}(T_{\Gamma})}{\mu_{\text{Соед.}j}(T_{\Gamma})}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{m_{\text{Соед.}j}}{m_{\text{Соед.}i}}\right)^{\frac{1}{4}}\right)^2}{\sqrt{8 \left(1 + \frac{m_{\text{Соед.}i}}{m_{\text{Соед.}j}}\right)}} \quad (3.161)$$

24.3 Расчёт динамической вязкости смеси по формуле Уилке [79], Па·с

Рассчитывается для следующих компонентов H_2O , CO_2 , N_2 , O_2 (3.162)

$$\mu_{\text{mix}}(T_{\Gamma}) = \sum_{i=1}^n \frac{x_{\text{Соед.}i} \mu_{\text{Соед.}j}(T_{\Gamma})}{\sum_{j=1}^n x_{\text{Соед.}j} \varphi_{\text{Соед.}i \text{ Соед.}j}(T_{\Gamma})} \quad (3.162)$$

24.4 Расчёт плотности смеси, кг/м³ (3.163)

$$\rho_{\text{mix}}(T_{\Gamma}) = \sum x_{\text{Соед.}} \rho_{\text{Соед.}}(T_{\Gamma}) \quad (3.163)$$

24.5 Расчёт кинематической вязкости, м²/с (3.164)

$$\nu_{\mu} = \frac{\mu_{\text{mix}}(T_{\Gamma})}{\rho_{\text{mix}}} \quad (3.164)$$

24.6 Расчёт теплопроводности газовой смеси, Вт/(м·К) (3.165)

$$\lambda_{\text{mix}}(T_{\Gamma}) = \sum x_{\text{Соед.}} \lambda_{\text{Соед.}}(T_{\Gamma}) \quad (3.165)$$

Шаг 25 – Расчёт критериев движения газовой фазы

25.1 Расчёт критерия Re

Формула для критерия Re в цепной зоне вращающейся печи представлена в работе [1] (3.166).

$$Re = \frac{w_{\Gamma} d_{\text{ц}}}{\nu_{\mu}} \quad (3.166)$$

25.2 Расчёт критерия Nu

Формула для критерия Nu в цепной зоне вращающейся печи представлена в работе [1] (3.167).

$$Nu = 0.137 Re^{0.75} \left(\frac{F_c}{F_{ca}}\right)^{-0.5} \quad (3.167)$$

Шаг 26 – Расчёт среднего коэффициента теплопередачи в цепной зоне

Формула для коэффициента теплопередачи в цепной зоне вращающейся печи представлена в работе [1] (3.168)

$$\alpha_{\text{ц}} = \frac{0.137 \lambda_{\text{mix}} w_{\Gamma}^{0.75}}{d_{\text{ц}}^{0.25} \nu_{\mu}^{0.75}} \left(\frac{F_c}{F_{ca}}\right)^{-0.5} \quad (3.168)$$

Шаг 27 – Расчёт длины цепной зоны

27.1 Расчёт теплоты, переданной материалу на участке цепной зоны, кДж/кг спек (3.169)

$$Q_M = H_M''' - H_M' + Q_{H_2O} \quad (3.169)$$

27.2 Расчёт площади футеровки цепной зоны, м²

По формуле из работы [1] 3.170

$$F_{ca} = \frac{\left(\frac{Q_M}{\alpha_{ц} \Delta T} - \pi D_{BH} L_S\right)}{K_{\Gamma} \frac{F_c}{F_{ca}} + 1} \quad (3.170)$$

27.3 Расчёт длины цепной зоны, м (3.171)

$$L = \frac{F_{ca}}{\pi D_{BH}} \quad (3.171)$$

Шаг 28 – Сравнение расчётной длины цепной зоны и реальной

28.1 Проверяем условие (3.172)

$$|L - L_{ц}| < tol_1 \quad (3.172)$$

Если условие выполняется, то расчёт заканчивается с выводом результатов. Если условие не выполняется, то алгоритм переходит к шагу 29.

Внутренний блок 2 – Вычисление значения температуры материала на выходе из цепной зоны

Шаги с 29 по 33 для удобства отображения вынесены в отдельный блок расчёта продемонстрированном на рисунке 3.19.

Шаг 29 – Вычисление длины цепной зоны при добавлении к температуре материала на выходе величины шага

Весь блок 1 (шаги с 9 по 27) пересчитываются заново, но вместо T_M'' используется значение $T_{M.plus}'' = T_M'' + z_1$. В результате вычисляется значение длины L_{plus} .

Шаг 30 – Расчёт производной по температуре материала на выходе (3.173)

$$\frac{dL}{dT_M''} = \frac{L_{plus} - L}{z_1} \quad (3.173)$$

Шаг 31 – Проверка значения модуля производной (3.174)

$$\left| \frac{dL}{dT_M''} \right| > 10^{-8} \quad (3.174)$$

Если модуль производной имеет какое-то не нулевое значение, то расчёт переходит к шагу 32. Если условие не выполняется, значит нет необходимости обновлять значение температуры материала на выходе, и расчёт переходит к шагу 41.



Рисунок 3.19 – Внутренний блок 2 «Вычисление значения температуры материала на выходе из цепной зоны» (составлено автором)

Шаг 32 – Обновление температуры материала на выходе

$$T''_M = T''_M - \frac{L - L_{ц}}{\frac{dL}{dT''_M}} \quad (3.175)$$

Значение, полученное в данном пункте для T''_M будет использовано в последующих расчётах.

Шаг 33 – Проверка того, что текущее значение температуры материала на выходе из цепной зоны больше ста градусов

Если $T''_M \geq 100$, то значение влажности материала на выходе из цепной зоны становится равно 0 и расчёт переходит к шагу 41. Если же значение температуры материала меньше ста градусов, то расчёт переходит к шагу 34.

Шаг 34 – Проверка того, что программа не достигла максимального количества итераций расчёта и длина зоны ещё чувствительна к дальнейшему изменению влажности материала на выходе

На данном шаге выполняется сравнение номера текущей итерации k со значением MI_3 и проверка флага p . Если номер текущей итерации меньше максимального и флаг $p = 0$, то расчёт переходит к шагу 35. Если одно из этих условий не соблюдается, то расчёт переходит к шагу 41.

Внутренний блок 3 – Вычисление значения влажности материала на выходе из цепной зоны

Шаги с 35 по 40 для удобства отображения вынесены в отдельный блок расчёта (рисунок 3.20).

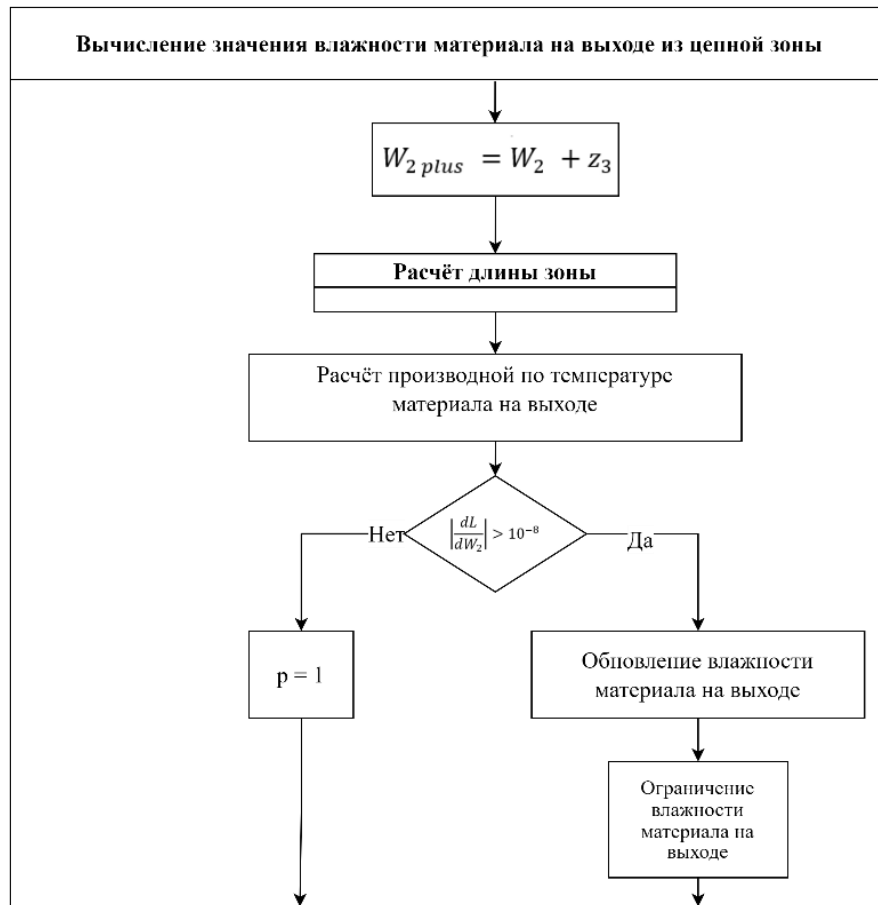


Рисунок 3.20 – Внутренний блок 3 «Вычисление значения влажности материала на выходе из цепной зоны» (составлено автором)

Шаг 35 – Вычисление длины цепной зоны при добавлении к влажности материала на выходе величины шага

Весь блок 1 (шаги с 9 по 27) пересчитываются заново, но вместо W_2 используется значение $W_{2 plus} = W_2 + z_3$. В результате вычисляется значение длины L_{plus} .

Шаг 36 – Расчёт производной по температуре материала на выходе

$$\frac{dL}{dW_2} = \frac{L_{plus} - L}{z_3} \quad (3.176)$$

Шаг 37 – Проверка значения модуля производной

$$\left| \frac{dL}{dW_2} \right| > 10^{-8} \quad (3.177)$$

Если модуль производной имеет какое-то не нулевое значение, то выполняется шаг 38. Если условие не выполняется, значит нет необходимости обновлять значение влажности

материала на выходе и следует завершить данный вложенный цикл, поэтому флаг p становится равным 1.

Шаг 38 – Обновление влажности материала на выходе (3.178)

$$W_2 = W_2 - K_{rel} \frac{L-L_{ц}}{\frac{dL}{dW_2}} \quad (3.178)$$

Шаг 39 – Ограничение влажности материала на выходе

На данном подпункте устанавливаются физические ограничения для влажности материала на выходе из цепной зоны. При расчёте влажность материала не может быть меньше нуля и выше влажности материала до цепной зоны.

Шаг 40 – Изменение значения счётчика итераций

К счётчику итераций k прибавляется единица и алгоритм возвращается к шагу 31. Так происходит до тех пор, пока флаг p не будет равен 1, либо пока значение k не превысит максимальное количество итераций M_3 . Если одно из этих событий произойдёт, то расчёт перейдет к шагу 41.

Внутренний блок 4 – Расчёт температуры корпуса печи

Шаги с 41 по 46 для удобства отображения вынесены в отдельный блок расчёта (рисунок 3.21).

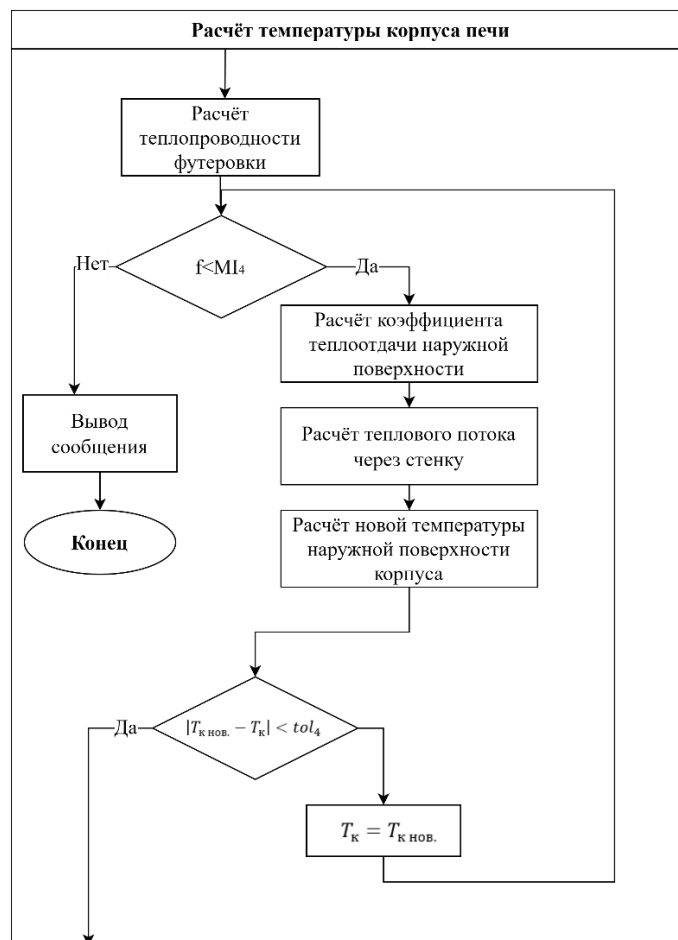


Рисунок 3.21 – Внутренний блок 4 «Расчёт температуры корпуса печи» (составлено автором)

Шаг 41 – Расчёт теплопроводности футеровки, Вт/(м·К)

Формула для расчёта теплопроводности шамотного кирпича в зависимости от температуры газа представлена в работе [21] (3.179).

$$\lambda_{\phi} = 0.7 + 0.00064T_{\Pi} \quad (3.179)$$

Шаг 42 – Проверка того, что программа не достигла максимального количества итераций расчёта

На данном шаге выполняется сравнение номера текущей итерации f со значением MI_4 . Если номер текущей итерации равен или больше максимального значения, то расчёт останавливается – алгоритм выводит сообщение о том, что достичь решения не удалось за поставленное количество итераций. Если номер же номер меньше, то выполняется шаг 43.

Шаг 43 – Расчёт коэффициента теплоотдачи наружной поверхности

Коэффициент теплоотдачи наружной поверхности Вт/(м²·К) учитывает потери в окружающую среду путем конвекции и излучения. Рассчитывается по формуле 3.180 из [21].

$$\alpha_{oc} = 7.7(1 + 0.001T_K) + 5.67\varepsilon \left(\frac{\left(\left(\frac{T_K + 2.73}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{oc} + 2.73}{100} \right)^4 \right)}{T_K - T_{oc}} \right) \quad (3.180)$$

Шаг 44 – Расчёт теплового потока через стенку

Рассчитывается по формуле из [21]. Формула из работы [21] учитывает теплообмен через стенку состоящую из слоя обмазки и футеровки, однако в случае с цепной зоной печи для спекания нефелинового концентрата с известняком, предполагается, что обмазка в зоне цепей отсутствует. Поэтому в формуле приведенной в данной работе отсутствует член, учитывающий толщину обмазки (3.181).

$$q_{ст} = \frac{2\pi(T_{\Pi} - T_{oc})}{\frac{1}{\lambda_{\phi}} \ln \left(\frac{D_{внеш.}}{D_{внеш.} - 2S_{\phi}} \right) + \frac{2}{\alpha_{oc} D_{внеш.}}} \quad (3.181)$$

Шаг 45 – Расчёт температуры наружной поверхности корпуса

На данном шаге производится расчёт новой температуры корпуса. Рассчитывается по формуле 3.182 из работы [58].

$$T_{K \text{ нов.}} = T_{oc} + \frac{q_{ст}}{\pi \alpha_{oc} D_{внеш.}} \quad (3.182)$$

Шаг 46 – Проверка сходимости температуры корпуса печи (3.183)

$$|T_{K \text{ нов.}} - T_K| < tol_4 \quad (3.183)$$

Если достигнута сходимости, то алгоритм расчёта переходит к шагу 47.

Если сходимость не достигнута, то к значению счётчика f прибавляется единица, за текущее значение температуры корпуса принимается новое рассчитанное значение температуры, а расчёт возвращается к шагу 42 (3.184).

$$T_K = T_{K \text{ нов.}} \quad (3.184)$$

Так продолжается до тех пор, пока либо не будет достигнута сходимость, либо значение счётчика итераций f не превысит максимальное MI_4 .

Шаг 47 – Сброс счётчиков и флагов внутренних циклов

На данном шаге производится сброс счётчиков j , k , f , а также флага p к нулевым значениям.

Шаг 48 – Изменение значения счётчика итераций

К счётчику итераций i прибавляется единица и алгоритм возвращается к шагу 6. Так происходит до тех пор, пока не будет верно условие в шаге 28, либо пока значение i не превысит максимальное количество итераций MI_1 . Если будет достигнуто максимальное количество итераций, то расчёт модели должен быть остановлен с ошибкой.

3.6 Модель химических превращений

Для реализации модели химических превращений использовалась модель предложенная в работе [36].

Химическая модель предназначена для расчёта изменения состава материала в зоне спекания трубчатой вращающейся печи. Она описывает основные превращения нефелиновой шихты при нагреве: разложение карбоната кальция, образование оксида кальция, выделение углекислого газа, взаимодействие оксида кальция с нефелиновой составляющей и свободным диоксидом кремния, а также образование промежуточных и растворимых соединений.

Расчёт выполняется для условной порции материала, которая последовательно перемещается вдоль длины печи. В качестве начального состояния используются параметры материала после цепной зоны: его температура, состав и расход. Дополнительно в модель передаются температурный профиль материала, скорость его осевого движения, параметры пылеуноса и пылевозврата, а также температурные зависимости кинетических и диффузионных коэффициентов.

На каждом шаге расчёта по длине печи определяется текущая температура порции материала и её скорость перемещения. По температуре выбираются коэффициенты скоростей химических реакций и коэффициенты диффузии. Затем рассчитываются текущие массы компонентов, их массовые доли, эффективные поверхности реагирующих частиц, толщина слоя продуктов реакции и интенсивность диффузионного переноса оксида кальция.

В модели учитывается, что по мере протекания реакций уменьшается количество исходных компонентов, изменяется поверхность частиц и возрастает сопротивление переносу через слой продуктов реакции. Поэтому скорости превращений зависят не только от температуры, но и от текущего состава материала, доступной поверхности реакции и толщины образующегося слоя.

Изменение количества компонентов описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений. В эту систему входят уравнения изменения массы известняка, связанного и выделяющегося углекислого газа, свободного и продифундировавшего оксида кальция, нефелина, промежуточного продукта, свободного диоксида кремния и растворимого оксида алюминия. Также учитывается изменение массы расчётной порции за счёт поступления и уноса технологической пыли.

Численное решение системы выполняется методом Рунге–Кутты четвёртого порядка. После каждого шага интегрирования обновляются массы компонентов, накопленное количество пыли, координата порции материала, время пребывания и температура предыдущего шага. Расчёт продолжается до тех пор, пока порция материала не пройдёт всю расчётную длину печи.

Результатом работы химической модели являются профили изменения состава материала по длине печи: остаточного известняка, оксида кальция, нефелина, свободного диоксида кремния, промежуточных продуктов, растворимого оксида алюминия, связанного и выделившегося углекислого газа, а также накопленной технологической пыли. Полученные данные используются далее в тепловой модели для уточнения состава материала по участкам печи, расчёта тепловых эффектов химических превращений и количества газообразных продуктов, поступающих в газовую фазу.

Рассмотрим алгоритм расчета модели, изображенный на рисунке 3.22.

Шаг 2 – Расчет массива коэффициентов пылевозрата на основе результатов модели пылеуноса и пылевозрата

2.1 Длина зоны пылевозрата, м (3.185)

$$L_j^{ret} = x_{j,2}^{ret} - x_{j,1}^{ret} \quad (3.185)$$

где $x_{j,2}^{ret}$ – начало зоны пылевозрата, м,

$x_{j,1}^{ret}$ – конец зоны пылевозрата, м.

2.2 Расход возвратной пыли по зоне, кг/ч (3.186)

$$M_{dust,ret,j} = \omega_j^{ret} \cdot M_{dust,ret} \quad (3.186)$$

где ω_j^{ret} – доля пылевозрата в зоне, доля ед.,

$M_{dust,ret}$ – общий расход возвращаемой пыли, кг/ч.

2.3 Интенсивность возврата пыли, кг/(ч·м) (3.187)

$$q_{dust,ret,j} = \frac{M_{dust,ret,j}}{L_j^{ret}} \quad (3.187)$$

2.4 Зональный коэффициент пылевозрата (3.188)

$$\eta_{ret,j}^{ch} = \frac{\omega_j^{ret}}{L_j^{ret}} \quad (3.188)$$

Шаг 3 – Расчет массива коэффициентов пылеуноса на основе результатов модели пылеуноса и пылевозврата

3.1 Изменение температуры, м (3.189)

$$\Delta T_j^{out} = T_{j,2}^{out} - T_{j,1}^{out} \quad (3.189)$$

где $T_{j,2}^{out}$ – температура в начале зоны, °C,

$T_{j,1}^{out}$ – температура в конце зоны, °C.

3.2 Расход уносимой пыли по зоне, кг/ч (3.190)

$$M_{dust,out,j} = \omega_j^{out} \cdot M_{dust,out} \quad (3.190)$$

где ω_j^{out} – доля пылеуноса в зоне, доля ед.,

$M_{dust,out}$ – общий расход уносимой пыли, кг/ч.

3.3 Условие распределения пылеуноса, кг/ч (3.191)

$$M_{dust,out,j} = \eta_{out,j}^{ch} \cdot Q_{sh}^{wet} \cdot \Delta T_j^{out} \quad (3.191)$$

где $\eta_{out,j}^{ch}$ – зональный коэффициент пылеуноса, кг/(м³·°C),

Q_{sh}^{wet} – объёмный расход влажной шихты, м³/ч,

ΔT_j^{out} – температурный перепад, °C.

3.4 Зональный коэффициент пылеуноса, кг/(м³·°C) (3.192)

$$\eta_{out,j}^{ch} = \omega_j^{out} \cdot \frac{M_{dust,out}}{Q_{sh}^{wet} \cdot \Delta T_j^{out}} \quad (3.192)$$

Шаг 4 – Задание расчетной порции (3.193)

$$M_{\Sigma,0}^{ch} = 1000 \quad (3.193)$$

Шаг 5 – Расчет начальных масс компонентов

5.1 Начальная масса нефелина, кг/кг (3.194)

$$M_{Nep,0}^{ch} = M_{\Sigma,0}^{ch} \cdot 0,0458 \cdot \left(R_{Na_2O}^{ch} - \rho_{Fe}^{ch} \cdot F_{Fe_2O_3}^{ch} \right) \quad (3.194)$$

где $R_{Na_2O}^{ch}$ – содержание Na_2O в материале, %

$F_{Fe_2O_3}^{ch}$ – содержание Fe_2O_3 в материале, %

ρ_{Fe}^{ch} – коэффициент, учитывающий часть щелочи, связанной с Fe_2O_3 .

5.2 Начальная масса известняка, кг/кг (3.195)

$$M_{CaCO_3,0}^{ch} = M_{\Sigma,0}^{ch} \cdot Y_{CaCO_3}^{0,ch} \quad (3.195)$$

где $Y_{CaCO_3}^{0,ch}$ – массовая доля $CaCO_3$ после цепной зоны.

5.3 Начальная масса связанного CO₂, кг/кг (3.196)

$$M_{CO_2,0}^{ch} = 0,44 \cdot M_{CaCO_3,0}^{ch} \quad (3.196)$$

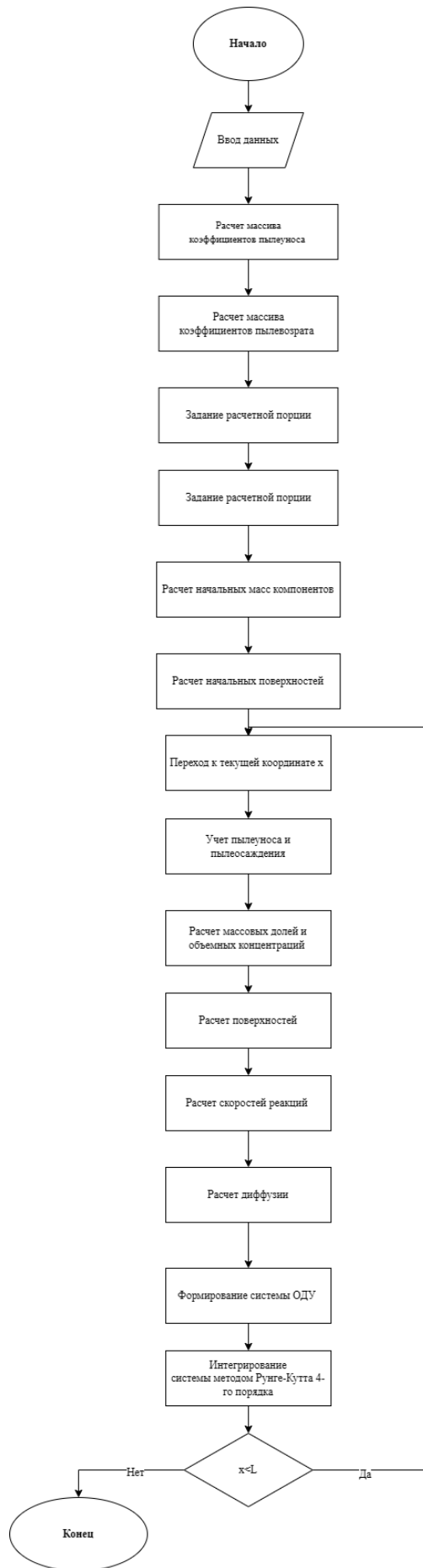


Рисунок 3.22 – Алгоритм расчета модели химических превращений (составлено автором)

5.4 Начальная масса свободного SiO_2 , кг/кг (3.197)

$$M_{\text{SiO}_2,0}^{\text{ch}} = M_{\Sigma,0}^{\text{ch}} \cdot \frac{Y_{\text{SiO}_2}^{0,\text{ch}}}{100} - 0,422 \cdot M_{\text{Nep},0}^{\text{ch}} \quad (3.197)$$

где $Y_{\text{SiO}_2}^{0,\text{ch}}$ – содержание SiO_2 в материале.

5.5 Начальная масса Al_2O_3 , кг/кг (3.198)

$$M_{\text{Al}_2\text{O}_3,0}^{\text{ch}} = M_{\Sigma,0}^{\text{ch}} \cdot Y_{\text{Al}_2\text{O}_3}^{0,\text{ch}} \quad (3.198)$$

где $Y_{\text{Al}_2\text{O}_3}^{0,\text{ch}}$ – массовая доля Al_2O_3 .

Шаг 6 – Расчет начальных поверхностей

6.1 Начальная поверхность нефелина, м^2 (3.199)

$$A_{\text{Nep},0}^{\text{ch}} = 0,1 \cdot M_{\text{Nep},0}^{\text{ch}} \cdot (1565,2 - 21 \cdot C_{\text{sieve}}^{\text{ch}}) \quad (3.199)$$

где $C_{\text{sieve}}^{\text{ch}}$ – остаток на сите 0,08 мм, %.

6.2 Начальная поверхность известняка, м^2 (3.200)

$$A_{\text{CaCO}_3,0}^{\text{ch}} = 0,1 \cdot M_{\text{CaCO}_3,0}^{\text{ch}} \cdot (1500 - 21 \cdot C_{\text{sieve}}^{\text{ch}}) \quad (3.200)$$

6.3 Начальная поверхность свободного SiO_2 (3.201)

$$A_{\text{SiO}_2,0}^{\text{ch}} = A_{\text{Nep},0}^{\text{ch}} \cdot 0,1195 \cdot \frac{M_{\text{SiO}_2,0}^{\text{ch}}}{M_{\text{Nep},0}^{\text{ch}}} \quad (3.201)$$

Шаг 7 – Переход к текущей координате

На первом шаге расчет начинается с конца расчета цепной завесы и соответственно её выходные параметры принимаются входными в данной модели.

Происходит обновление температуры материала на основе координаты из модели теплообмена (3.202), а также обновление скорости на основе результатов расчета модели осевого движения (3.203).

$$T_m^{\text{ch}} = T_{m(x^{\text{ch}})} \quad (3.202)$$

$$u_m^{\text{ch}} = \frac{u_{m(x^{\text{ch}})}}{60} \quad (3.203)$$

где T_m^{ch} – температура материала на текущем шаге химической модели, °С

u_m^{ch} – скорость материала из механической модели, м/ч.

По обновленному значению температуры выбираются коэффициенты P1, P2, P3, P4, D1, D2, которые идентифицируются для каждой печи отдельно на данной модели.

Шаг 8 – Учет пылеуноса и пылеосаждения

8.1 Текущий поток пыли, кг/мин (3.204)

$$\dot{M}_{\text{dust}}^{\text{ch}} = \eta_{\text{ret}}^{\text{ch}} \cdot \frac{M_{\text{dust,ret}}}{60} - \eta_{\text{out}}^{\text{ch}} \cdot \frac{Q_{\text{sh}}^{\text{wet}}}{60} \quad (3.204)$$

где $M_{\text{dust,ret}}$ – расход возвращаемой пыли, кг/ч

$Q_{\text{sh}}^{\text{wet}}$ – объёмный расход влажной шихты, $\text{м}^3/\text{ч}$.

8.2 Накопленная масса пыли, кг (3.205)

$$M_{dust,\Sigma}^{ch(\tau^{ch}+\Delta\tau^{ch})} = M_{dust,\Sigma}^{ch(\tau^{ch})} + \dot{M}_{dust}^{ch} \cdot \Delta\tau^{ch} \quad (3.205)$$

где $\Delta\tau^{ch}$ - шаг интегрирования, мин.

Шаг 9 – Расчет массовых долей и объемных концентраций

9.1 Массовая доля свободного СаО (3.206)

$$Y_{CaO,V}^{ch} = \frac{M_{CaO,V}^{ch}}{M_{\Sigma}^{ch}} \quad (3.206)$$

9.2 Массовая доля СаО после первого слоя (3.207)

$$Y_{CaO,1}^{ch} = \frac{M_{CaO,1}^{ch}}{M_{\Sigma}^{ch}} \quad (3.207)$$

9.3 Массовая доля СаО у поверхности нефелина (3.208)

$$Y_{CaO,2}^{ch} = \frac{M_{CaO,2}^{ch}}{M_{\Sigma}^{ch}} \quad (3.208)$$

9.4 Массовая доля нефелина (3.209)

$$Y_{Nep}^{ch} = \frac{M_{Nep}^{ch}}{M_{\Sigma}^{ch}} \quad (3.209)$$

9.5 Массовая доля NAS (3.210)

$$Y_{NAS}^{ch} = \frac{M_{NAS}^{ch}}{M_{\Sigma}^{ch}} \quad (3.210)$$

9.6 Массовая доля свободного SiO₂ (3.211)

$$Y_{SiO_2}^{ch} = \frac{M_{SiO_2}^{ch}}{M_{\Sigma}^{ch}} \quad (3.211)$$

9.10 Объемная концентрация свободного СаО, кг/м³ (3.212)

$$\Gamma_{CaO,V}^{ch} = Y_{CaO,V}^{ch} \cdot \rho_{CaO}^{ch} \quad (3.212)$$

9.11 Объемная концентрация СаО после первого слоя, кг/м³ (3.213)

$$\Gamma_{CaO,1}^{ch} = Y_{CaO,1}^{ch} \cdot \rho_{CaO}^{ch} \quad (3.213)$$

9.12 Объемная концентрация СаО у поверхности нефелина, кг/м³ (3.214)

$$\Gamma_{CaO,2}^{ch} = Y_{CaO,2}^{ch} \cdot \rho_{CaO}^{ch} \quad (3.214)$$

Шаг 10 – Расчет поверхностей

10.1 Поверхность известняка, м² (3.215)

$$A_{CaCO_3}^{ch} = A_{CaCO_{3,0}}^{ch} \cdot \left(\frac{M_{CaCO_3}^{ch}}{M_{CaCO_{3,0}}^{ch}} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (3.215)$$

10.2 Поверхность СаО, м² (3.216)

$$A_{CaO}^{ch} = \frac{A_{CaCO_{3,0}}^{ch}}{M_{CaCO_{3,0}}^{ch}} \cdot (M_{CaO,V}^{ch})^{\frac{2}{3}} \quad (3.216)$$

10.3 Поверхность нефелина с учетом пыли, м² (3.217)

$$A_{Nep,0}^{ch} = A_{Nep,0}^{ch} + \frac{y_{Nep}^{dust} \cdot M_{dust,\Sigma}^{ch} \cdot A_{Nep,0}^{ch}}{M_{Nep,0}^{ch}} \quad (3.217)$$

10.4 Текущая поверхность нефелина, м² (3.218)

$$A_{Nep}^{ch} = A_{Nep,0}^{ch} \cdot \left(\frac{M_{Nep}^{ch}}{M_{Nep,0}^{ch}} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (3.218)$$

10.5 Активная поверхность реакции, м² (3.219)

$$A_r^{ch} = \begin{cases} A_{Nep}^{ch} \text{ при } A_{CaO}^{ch} > A_{Nep}^{ch}; \\ 0,8 \cdot A_{CaO}^{ch} \text{ при } A_{CaO}^{ch} \leq A_{Nep}^{ch} \end{cases} \quad (3.219)$$

10.6 Начальный эквивалентный радиус, м (3.220)

$$R_{Nep,0}^{ch} = \left(\frac{A_{Nep,0}^{ch} + A_{SiO_2,0}^{ch}}{4\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.220)$$

10.7 Текущий эквивалентный радиус, м (3.221)

$$R_{Nep}^{ch} = \left(\frac{A_{Nep}^{ch} + A_{SiO_2,0}^{ch} \cdot \frac{M_{SiO_2}^{ch}}{M_{SiO_2,0}^{ch}}}{4\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.221)$$

10.8 Толщина слоя продуктов реакции, м (3.222)

$$\delta_{pr}^{ch} = R_{Nep,0}^{ch} \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{M_{Al_2O_3}^{ch} + M_{SiO_2,0}^{ch} - M_{SiO_2}^{ch}}{M_{Al_2O_3,0}^{ch} + M_{SiO_2,0}^{ch}} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \quad (3.222)$$

10.9 Толщина промежуточного слоя, м (3.223)

$$\delta_{int}^{ch} = R_{Nep,0}^{ch} - \delta_{pr}^{ch} - R_{Nep}^{ch} \quad (3.223)$$

Шаг 11 – Расчет скоростей реакции

11.1 Скорость реакции (1.5), кг/мин (3.224)

$$r_{P1}^{ch} = k_1^{ch} \cdot A_{CaCO_3}^{ch} \quad (3.224)$$

11.2 Скорость реакции (1.6), кг/мин (3.225)

$$r_{P2}^{ch} = k_2^{ch} \cdot Y_{Nep}^{ch} \cdot (Y_{CaO,1}^{ch})^2 \cdot A_r^{ch} \quad (3.225)$$

11.3 Скорость реакции (1.7), кг/мин (3.226)

$$r_{P3}^{ch} = k_3^{ch} \cdot Y_{NAS}^{ch} \cdot (Y_{CaO,2}^{ch})^2 \cdot A_r^{ch} \quad (3.226)$$

11.4 Скорость реакции $2CaO + SiO_2 = 2CaO \cdot SiO_2$, кг/мин (3.227)

$$r_{P4}^{ch} = k_4^{ch} \cdot Y_{SiO_2}^{ch} \cdot (Y_{CaO,1}^{ch})^2 \cdot A_r^{ch} \quad (3.227)$$

Шаг 12 – Расчет диффузии

12.1 Поток J_1^{ch} , кг/мин характеризует перенос CaO через слой продуктов реакции NAS+C2S (3.228).

$$J_1^{ch} = \left(D_1^{ch} \cdot \frac{A_r^{ch}}{\delta_{pr}^{ch}} \right) \cdot (\Gamma_{CaO,V}^{ch} - \Gamma_{CaO,1}^{ch}) \quad (3.228)$$

12.2 Поток J_2^{ch} , кг/мин характеризует дальнейшую диффузию СаО через промежуточный слой к поверхности нефелиновой частицы, где протекают реакции образования растворимых соединений (3.229)

$$J_2^{ch} = \left(D_2^{ch} \cdot \frac{A_r^{ch}}{\delta_{int}^{ch}} \right) \cdot (\Gamma_{CaO,1}^{ch} - \Gamma_{CaO,2}^{ch}) \quad (3.229)$$

Шаг 13 – Формирование системы ОДУ

13.1 Изменение СаСО₃, кг/мин (3.230)

$$\frac{dM_{CaCO_3}^{ch}}{d\tau^{ch}} = y_{CaCO_3}^{dust} \cdot \dot{M}_{dust}^{ch} - r_{P1}^{ch} \quad (3.230)$$

13.2 Изменение связанного СО₂, кг/мин (3.231)

$$\frac{dM_{CO_2}^{ch}}{d\tau^{ch}} = 0,44 \cdot \frac{dM_{CaCO_3}^{ch}}{d\tau^{ch}} \quad (3.231)$$

13.3 Изменение массы порции, кг/мин (3.232)

$$\frac{dM_{\Sigma}^{ch}}{d\tau^{ch}} = \dot{M}_{dust}^{ch} - 0,445 \cdot r_{P1}^{ch} \quad (3.232)$$

13.4 Изменение свободного СаО, кг/мин (3.233)

$$\frac{dM_{CaO,V}^{ch}}{d\tau^{ch}} = 0,56 \cdot r_{P1}^{ch} - J_1^{ch} + y_{CaO}^{dust} \cdot \dot{M}_{dust}^{ch} \quad (3.233)$$

13.5 Изменение СаО после первого слоя, кг/мин (3.234)

$$\frac{dM_{CaO,1}^{ch}}{d\tau^{ch}} = J_1^{ch} - J_2^{ch} - 1,1 \cdot r_{P3}^{ch} - 1,866 \cdot r_{P4}^{ch} \quad (3.234)$$

13.6 Изменение нефелина, кг/мин (3.235)

$$\frac{dM_{Nep}^{ch}}{d\tau^{ch}} = y_{Nep}^{dust} \cdot \dot{M}_{dust}^{ch} - 1,27 \cdot r_{P2}^{ch} \quad (3.235)$$

13.7 Изменение NAS, кг/мин (3.236)

$$\frac{dM_{NAS}^{ch}}{d\tau^{ch}} = r_{P2}^{ch} - 2,2 \cdot r_{P3}^{ch} \quad (3.236)$$

13.8 Изменение SiO₂, кг/мин (3.237)

$$\frac{dM_{SiO_2}^{ch}}{d\tau^{ch}} = -r_{P4}^{ch} \quad (3.237)$$

13.9 Образование растворимого Al₂O₃, кг/мин (3.238)

$$\frac{dM_{Al_2O_3}^{ch}}{d\tau^{ch}} = r_{P3}^{ch} \quad (3.238)$$

Шаг 14 – Интегрирование системы методом Рунге-Кутты 4-го порядка

Выполняется численное интегрирование системы ОДУ методом Рунге–Кутты 4-го порядка. На основе текущих скоростей реакций и диффузионных потоков рассчитываются новые значения масс компонентов расчётной порции материала на следующем временном шаге.

После интегрирования происходит обновление осевой координаты (3.239), времени (3.240) и температуры предыдущего шага (3.241)

$$x_{j+1}^{ch} = x_j^{ch} + u_{m,j}^{ch} \cdot \Delta\tau^{ch} \quad (3.239)$$

$$\tau_{j+1}^{ch} = \tau_j^{ch} + \Delta\tau^{ch} \quad (3.240)$$

$$T_{m,prev}^{ch} = T_{m,j}^{ch} \quad (3.241)$$

Шаг 15 – Проверка прошла ли порция материала по всей длине печи

Выполняется ли условие:

$$x_{j+1}^{ch} < L \quad (3.242)$$

Если условие выполняется, то алгоритм возвращается к шагу расчета 11, если не выполняется, то расчёт прекращается с сообщением об ошибке расчёта.

Шаг 10 – Проверка достигнута ли максимальная итерация по плотности

Выполняется ли условие:

$$i < i_{max} \quad (3.47)$$

Если условие выполняется, то алгоритм переходит к шагу расчета 7, если не выполняется, то расчёт успешно завершается.

Результатом расчет модели являются профиль декарбонизации и перехода Al_2O_3 в растворимую фазу, представленные на рисунках 3.23 и 3.24.

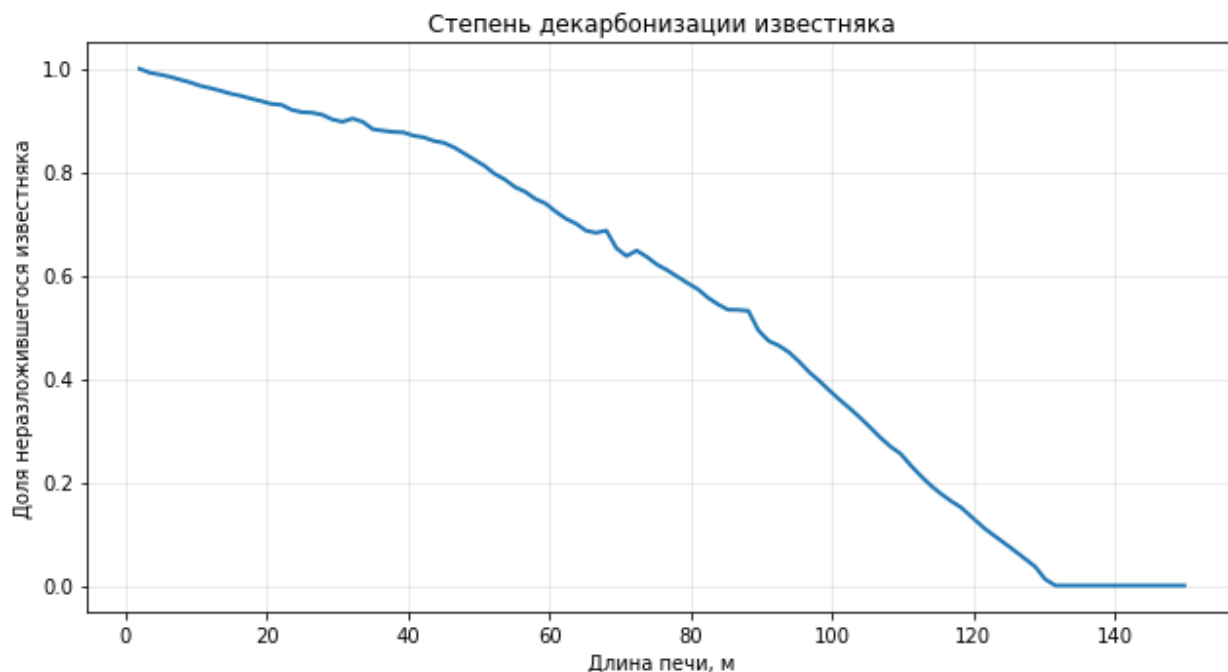


Рисунок 3.23 – Степень декарбонизации известняка (составлено автором)

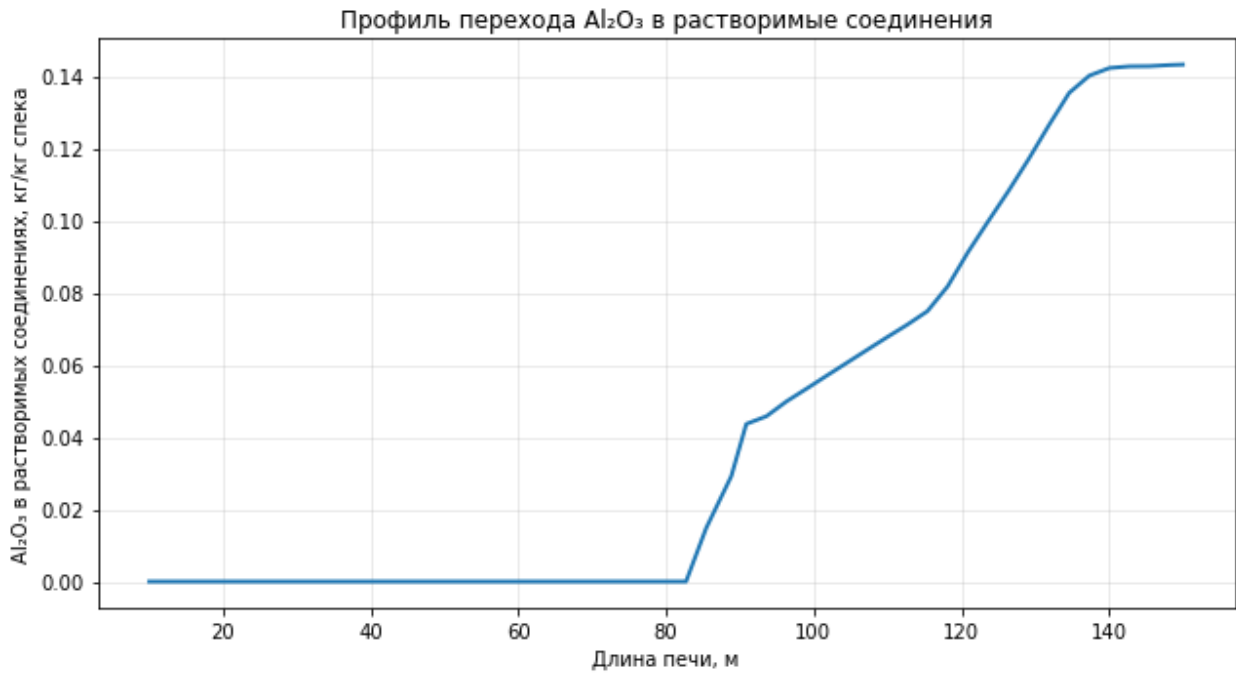


Рисунок 3.24 – Профиль перехода известняка в растворимые соединения (составлено автором)

3.7 Модель теплообмена

В качестве модели теплообмена за основу взят алгоритм расчета изложенный в работе [58], скорректированный с учетом особенностей нефелиновых печей, таких как подача пыли не с шихтовым материалом, а в зону факела.

Модель теплообмена предназначена для расчета температурного состояния материала, газового потока и элементов футеровки в расчетных зонах трубчатой вращающейся печи. Она используется как один из блоков комплексной математической модели процесса спекания и позволяет определить изменение температуры материала по длине агрегата с учетом теплового взаимодействия между газовой фазой, слоем шихты, внутренней поверхностью футеровки, обмазкой, корпусом печи и окружающей средой.

В основу модели положен зональный подход, при котором рабочее пространство печи разбивается на отдельные участки. Для каждой зоны задаются начальные технологические параметры: температура материала на входе, температура газа на выходе, состав материала, состав газового потока, расход клинкера, геометрические характеристики слоя, толщина футеровки и обмазки, а также теплофизические свойства участвующих сред. Расчет выполняется последовательно от зоны к зоне, при этом результаты предыдущего участка используются как исходные данные для следующего.

В модели учитываются основные механизмы переноса теплоты: конвективный теплообмен между газом и материалом, лучистый теплообмен между газовой средой и материалом, конвективный и лучистый теплообмен между газом и открытой поверхностью футеровки, лучистый теплообмен между футеровкой и материалом, а также теплотери через

футеровку, слой обмазки и наружную поверхность корпуса в окружающую среду. Дополнительно учитывается влияние геометрии слоя материала на площадь теплообмена, эффективную длину луча и степень заполнения поперечного сечения печи.

Особенностью модели является совместный учет теплового баланса и химико-физических превращений материала. При расчете энтальпийного состояния учитываются нагрев компонентов шихты, выделение и испарение влаги, образование водяного пара, выделение углекислого газа при разложении карбоната кальция, тепловой эффект декарбонизации, а также тепловой эффект образования спека. Это позволяет связать теплообмен в печи не только с температурным режимом, но и с изменением вещественного состава материала по длине агрегата.

Температура газа на входе расчетной зоны определяется из энтальпийного баланса, включающего энтальпию газовой фазы, материала, пыли, тепловые эффекты реакций, фазовый переход влаги и теплотери в окружающую среду. Температура материала на выходе зоны находится численным подбором: расчетная длина зоны сравнивается с заданной геометрической длиной, после чего значение температуры корректируется до выполнения условия совпадения. Такой подход позволяет определить температуру материала, соответствующую фактической длине рассматриваемого участка печи.

Отдельно в модели рассчитывается температура внутренней поверхности футеровки. Она определяется итерационно из теплового баланса между поступающими потоками от газовой среды, отдачей теплоты материалу, теплопередачей через футеровку и потерями в окружающую среду. При этом учитываются теплофизические свойства футеровки или обмазки, степень черноты поверхностей, радиационные характеристики газовой среды, запыленность газового потока и время одного оборота печи.

Алгоритм расчета схож с алгоритмом расчета цепной зоны и уже был подробно рассмотрен ранее. Ключевым отличием является отсутствие итеративного расчета влажности шихты. Поэтому в данном разделе ограничимся описанием основных шагов.

Шаг 1 – Чтение начальных температур, составов и расходов

1.1 Температура материала на входе в зону

Известна из расчета прошлого участка, если участок первый, то берутся выходные данные модели цепной зоны (3.243).

$$t_{m,1} = T_{m,in} \quad (3.243)$$

1.2 Температура газа на выходе из зоны

Известна из расчета прошлого участка, если участок первый, то берутся выходные данные модели цепной зоны (3.244).

$$t_{g,2} = T_{g,out} \quad (3.244)$$

1.3 Расход шихты на входе (3.245) и выходе зоны (3.246)

$$G_{sh,1} = G_{спек} G_{ud,1} \quad (3.245)$$

$$G_{sh,2} = G_{спек} G_{ud,2} \quad (3.246)$$

где G_{ud} – удельный расход материала, кг/кг кл.

Известны из модели движения и химических превращений

1.4 Масса компонента материала на входе (3.247) и выходе зоны (3.248)

$$G_{M,i,1} = w_{(i,1)} G_{sh,1} \quad (3.247)$$

$$G_{M,i,2} = w_{(i,2)} G_{sh,2} \quad (3.248)$$

где w_i – массовая доля i -го компонента, доли ед.

1.5 Суммарная масса компонентов (3.249, 3.250)

$$G_{M,1} = \sum G_{M,i,1} \quad (3.249)$$

$$G_{M,2} = \sum G_{M,i,2} \quad (3.250)$$

1.6 Удельное количество компонента на 1 кг спека (3.251, 3.252)

$$M_{i,1} = \frac{G_{M,i,1}}{G_{M,1} G_{ud,1}} \quad (3.251)$$

$$M_{i,2} = \frac{G_{M,i,2}}{G_{M,2} G_{ud,2}} \quad (3.252)$$

Шаг 2 – Расчет количества водяного пара и углекислого газа

2.1 Количество водяного пара от всей влаги (3.253)

$$V_{H_2O,all} = \frac{G_{M,H_2O,1}}{\rho_{H_2O}} \quad (3.253)$$

2.2 Количество водяного пара, образующегося в зоне (3.254)

$$V_{H_2O,zone} = \frac{G_{M,H_2O,1} - G_{M,H_2O,2}}{\rho_{H_2O}} \quad (3.254)$$

2.3 Водяной пар, образующийся за пределами данной зоны (3.255)

$$V_{H_2O,other} = V_{H_2O,all} - V_{H_2O,zone} \quad (3.255)$$

2.4 Масса известняка внутри зоны и после (3.256)

Берется из модели химических превращений $G_{CO_2,zone}$ и $G_{CO_2,end}$

$$V_{CO_2,zone} = \frac{G_{CO_2,zone}}{\rho_{CO_2}} \quad V_{CO_2,before} = \frac{G_{CO_2,end}}{\rho_{CO_2}} \quad (3.256)$$

2.5 Удельная масса CO_2 на кг спека (3.257)

$$G_{CO_2,спек} = \frac{G_{CO_2,zone}}{G_{спек}} \quad (3.257)$$

Шаг 3 – Формирование состава газовой фазы на входе и выходе зоны

3.1 Состав газа на входе зоны (3.258-3.261)

$$V_{H_2O,1} = \frac{V_{H_2O,other} + V_{H_2O,sv} + V_{h_2o}}{G_{спек}} \quad (3.258)$$

$$V_{CO_2,1} = \frac{V_{CO_2,before} + V_{CO_2}}{G_{\text{спек}}} \quad (3.259)$$

$$V_{N_2,1} = \frac{V_{N_2}}{G_{\text{спек}}} \quad (3.260)$$

$$V_{O_2,1} = \frac{V_{O_2}}{G_{\text{спек}}} \quad (3.261)$$

3.2 Состав газа на выходе зоны (3.262-3.265)

$$V_{H_2O,2} = \frac{V_{H_2O,other} + V_{H_2O,sv} + V_{H_2O} + V_{H_2O,zone}}{G_{\text{спек}}} \quad (3.262)$$

$$V_{CO_2,2} = \frac{V_{CO_2,before} + V_{CO_2} + V_{CO_2,zone}}{G_{\text{спек}}} \quad (3.263)$$

$$V_{N_2,2} = \frac{V_{N_2}}{G_{\text{спек}}} \quad (3.264)$$

$$V_{O_2,2} = \frac{V_{O_2}}{G_{\text{спек}}} \quad (3.265)$$

Шаг 4 - Расчет энтальпий материала и газа

Для нефелина и продуктов спекания используются отдельные интерполяционные функции теплоемкости, а для остальных компонентов - таблицы энтальпии нагрева.

Вычисляются энтальпии материалов и газов при температуре материала и газа на входе и выходе соответственно. Затем через сумму компонентов определяются $H_{M,1}$, $H_{M,2}$, $H_{G,2}$

Шаг 5 – Учет тепловых эффектов реакций и испарения влаги

5.1 Масса разложившегося $CaCO_3$ (3.266)

$$G_{CaCO_3,react} = \frac{G_{CO_2,спек} \cdot 100}{44} \quad (3.266)$$

5.2 Масса образовавшегося спека (3.267)

$$\Delta G_{\text{спек}} = (M_{NA,2} + M_{C_{2S},2}) - (M_{NA,1} + M_{C_{2S},1}) \quad (3.267)$$

5.3 Тепловой эффект декарбонизации (3.268)

$$Q_{dec} = G_{CaCO_3,react} H_{dec} \quad (3.268)$$

где $H_{dec} = 1780$ кДж/кг $CaCO_3$

5.4 Тепловой эффект образования спека (3.269)

$$Q_{\text{спек}} = \Delta G_{\text{спек}} H_{\text{спек}} \quad (3.269)$$

где $H_{\text{спек}} = -1027$ кДж/кг спека

5.5 Энтальпия материала с учетом реакций (3.270)

$$H_{M,2}^* = H_{M,2} + Q_{dec} + Q_{\text{спек}} \quad (3.270)$$

5.6 Изменение количества влаги (3.271)

$$\Delta M_{H_2O} = M_{H_2O,1} - M_{H_2O,2} \quad (3.271)$$

5.7 Теплота фазового перехода воды (3.272)

$$Q_{\text{phase}} = \Delta M_{H_2O} * r \quad (3.272)$$

где $r = 2257$ кДж/кг

Шаг 6 – Первичный расчет теплотерь и энтальпии пыли

6.1 Первичный тепловой поток в окружающую среду

Рассчитывается по формуле (3.141)

6.2 Удельные теплотерии зоны

Рассчитывается по формуле (3.142)

6.3 Начальное приближение температуры газа на входе (3.273)

$$t_{g,1}^0 = t_{g,2} \quad (3.273)$$

6.4 Расчет энтальпии пыли на входе и выходе

Для нефелина и продуктов спекания используются отдельные интерполяционные функции теплоемкости, а для остальных компонентов - таблицы энтальпии нагрева.

Вычисляются энтальпии пыли при температуре газа на входе и выходе соответственно. Затем через сумму компонентов определяются $H_{D,in}$, $H_{D,out}$

Шаг 7 – Итерационный расчет температуры газа на входе зоны

На этом шаге по балансу энтальпий рассчитывается требуемая энтальпия газа на входе зоны. Затем численно решается уравнение относительно температуры газа на входе. Итерационный цикл повторяет расчет энтальпий материала, газа и пыли, затем заново формирует баланс и решает уравнение для $t_{g,1}$ методом Ньютона.

7.1 Тепловой баланс для входящего газа в зону (3.274)

$$H_{G,1} = H_{G,2} + H_{M,2}^* + H_{D,out} - H_{D,in} - H_{M,1} + Q_{oc} + Q_{phase} \quad (3.274)$$

где $H_{M,2}^*$ – энтальпия материала на выходе из зоны с учетом реакций, кДж/кг кл,

$H_{M,1}$ – энтальпия материала на входе в зону, кДж/кг кл,

$H_{D,in}$ – энтальпия пыли на входе в зону, кДж/кг кл,

$H_{D,out}$ – энтальпия пыли на выходе из зоны, кДж/кг кл,

Q_{oc} – удельные потери теплоты в окружающую среду, кДж/кг кл,

Q_{phase} – теплота испарения влаги, кДж/кг кл.

7.2 Критерий сходимости (3.275)

$$|t_{g,1}^{new} - t_{g,1}^{old}| < tol_2 \quad (3.275)$$

Шаг 8 - Расчет средних температур и среднего состава газа

8.1 Средняя температура газа (3.276)

$$t_{g,avg} = 0.5(t_{g,1} + t_{g,2}) \quad (3.276)$$

8.2 Средняя температура материала (3.277)

$$t_{m,avg} = 0.5(t_{m,1} + t_{m,2}) \quad (3.277)$$

8.3 Начальное приближение температуры внутренней поверхности (3.278)

$$t_p^0 = t_{g,avg} - 200 \quad (3.278)$$

8.4 Средний объем компонента газа (3.279)

$$V_{i,avg} = 0.5(V_{i,1} + V_{i,2}) \quad (3.279)$$

8.5 Суммарный средний объем газа (3.280)

$$V_g = \sum V_{i,avg} \quad (3.280)$$

Шаг 9 – Геометрия слоя материала в поперечном сечении

Высота, степень заполнения и угол известны из модели осевого движения.

9.1 Хорда материала (3.281)

$$l_M = D_{BH} \sin\left(\pi \frac{\varepsilon}{360}\right) \quad (3.281)$$

9.2 Длина поверхности под материалом (3.282)

$$l_p'' = \frac{\pi \varepsilon D_{BH}}{2} \quad (3.282)$$

9.3 Открытая длина футеровки (3.283)

$$l_p' = \pi D_{BH} - l_p'' \quad (3.283)$$

9.4 Эффективная длина луча (3.284)

$$S = 0.9 D_{BH} \left(1 - \frac{S_M}{100}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.284)$$

Шаг 10 – Свойства газовой среды и коэффициент конвективной теплоотдачи

10.1 Доля трёхатомных газов (3.285, 3.286)

$$p_{CO_2} = \frac{V_{CO_2,avg}}{V_g} \quad (3.285)$$

$$p_{H_2O} = \frac{V_{H_2O,avg}}{V_g} \quad (3.286)$$

10.2 Средняя концентрация пыли (3.287)

$$x_p = \frac{(D_{CaCO_3,in} + D_{Nep,in}) + (D_{CaCO_3,out} + D_{Nep,out})}{2V_g} \quad (3.287)$$

10.3 Степень черноты газа (3.288)

$$\varepsilon_r = 1 - \exp\left(\left(-\frac{0.8 + 1.6 p_{H_2O}}{\sqrt{S(p_{H_2O} + p_{CO_2})}} \cdot \left(1 - 0.38 \frac{t_g + 273}{1000}\right) (p_{H_2O} + p_{CO_2}) + 7x_p \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{d_{II}^2 (t_g + 273)^2}}\right) S\right) \quad (3.288)$$

10.4 Степень черноты газа при температуре материала

Рассчитывается аналогично шагу 10.3 только используется температура материала

10.5 Скорость газа (3.289)

$$v_g = \frac{G_{спек} V_g}{F_{free}} \quad (3.289)$$

10.6 Теплопроводность газа (3.290)

$$\lambda_g = 0.0228 + 0.000086 t_{g,avg} \quad (3.290)$$

10.7 Эффективный диаметр газового потока (3.291)

$$D_{eff} = D_{вн} \left(1 - \frac{s_M}{100}\right)^{1/2} \quad (3.291)$$

10.8 Коэффициент конвективной теплоотдачи (3.292)

$$\alpha_k = 0.026 \frac{(v_{г.г})^{0.8} \lambda_{г}^{0.2}}{D_{eff}^{0.2}} \quad (3.292)$$

Шаг 11 – Предварительные тепловые потоки газ - материал и температура корпуса

11.1 Конвективный поток от газа к материалу (3.292)

$$q_{г-м}^{конв} = \alpha_k (t_{г.ср} - t_{м.ср}) l_m \quad (3.293)$$

11.2 Лучистый поток от газа к материалу (3.294)

$$q_{г-м}^{излу} = 5.67 \frac{\varepsilon_M + 1}{2} \left(\varepsilon_{г} \left(\frac{t_{г.ср}}{100} + 2.73 \right)^4 - \varepsilon_{г.м} \left(\frac{t_{м.ср}}{100} + 2.73 \right)^4 \right) l_m \quad (3.294)$$

11.3 Коэффициент теплоотдачи от корпуса (3.295)

$$\alpha_{oc} = 7.7 + (1 + 0.001 t_k) + 5.67 \varepsilon_k \frac{\left(\frac{t_k}{100} + 2.73 \right)^4 - \left(\frac{t_{oc}}{100} + 2.73 \right)^4}{t_k - t_{oc}} \quad (3.295)$$

11.4 Уточнение температуры корпуса (3.296)

$$t_k = t_{oc} + \frac{q_{oc}}{\pi \alpha_{oc} D_{out}} \quad (3.296)$$

Шаг 12 – Итерационный расчет температуры внутренней поверхности футеровки

Температура внутренней поверхности футеровки рассчитывается во внутреннем цикле. На каждой итерации уточняются теплофизические свойства слоя, критерии теплообмена, тепловые потоки к футеровке и потери наружу. После этого вычисляется новое значение температуры поверхности.

12-1 Теплопроводность шамота (3.297):

$$\lambda_f = 0.7 + 0.00064 (t_p + 273) \quad (3.297)$$

где t_p – температура внутренней поверхности футеровки, °С.

12-2 Теплопроводность обмазки (3.298):

$$\lambda_{об} = 8.1 * 10^{-6} \rho_{об}^{1.5} \quad (3.298)$$

12.3 Выбор активного слоя

Если на участке есть обмазка, то в качестве плотности, теплопроводности и теплоемкости внутренней поверхности печи используются характеристик обмазки, если же обмазка отсутствует, то используются характеристики футеровки.

12.4 Степень черноты газа при температуре футеровки

Рассчитывается аналогично шагу 10.3 только используется температура внутренней поверхности печи (3.299-3.305)

$$\alpha_{ср} = 5,67 \varepsilon_m \varepsilon_p \left[\left(\frac{t_p}{100} + 2,73 \right)^4 - \left(\frac{t_M}{100} + 2,73 \right)^4 \right] \frac{1}{\pi D_{внутр}} \left(\frac{1}{t_r t_p} + \frac{1}{t_p - t_M} \right) \quad (3.299)$$

$$H = \frac{\alpha_{cp}^2 \tau_0}{c_p \lambda_p \rho_p} \quad (3.300)$$

$$A = \frac{l_p''}{\pi D_{\text{внутр}}} \quad (3.301)$$

$$I = 0,03 + 0,11\sqrt{H}, \text{ если } A \leq 0,7 \quad (3.302)$$

$$I = 0,03 + 0,09\sqrt{H}, \text{ если } 0,7 < A < 0,8 \quad (3.303)$$

$$I = 0,024 + 0,08\sqrt{H}, \text{ если } A \geq 0,8 \quad (3.304)$$

$$\text{при } I > 0,2, \text{ принять } I = 0,2 \quad (3.305)$$

где l_p'' – длина внутренней поверхности под материалом, м,

H – критерий теплообмена.

12.5 Тепловой поток теплопроводностью от материала к внутренней поверхности печи, Вт/м (3.306)

$$q_{\text{п.м}}^T = \pi D_{\text{внутр}} \sqrt{\frac{c_p \lambda_p \rho_p}{\tau_{\text{об}}}} I (t_r - t_m) \quad (3.306)$$

12.6 Тепловой поток излучением от газа к внутренней поверхности печи, Вт/м (3.307)

$$q_{\text{г-м}}^{\text{излу}} = 5.67 \frac{\varepsilon_{\text{м}} + 1}{2} \left(\varepsilon_{\text{г}} \left(\frac{t_{\text{г.ср}}}{100} + 2.73 \right)^4 - \varepsilon_{\text{г.м}} \left(\frac{t_{\text{м.ср}}}{100} + 2.73 \right)^4 \right) l_m \quad (3.307)$$

12.7 Конвективный тепловой поток от газа к внутренней поверхности печи, Вт/м (3.307)

$$q_{\text{г-п}}^{\text{КОНВ}} = \alpha_k (t_{\text{г.ср}} - t_{\text{п}}) l_p \quad (3.307)$$

12.8 Тепловой поток излучением от внутренней поверхности печи к материалу, Вт/м (3.308)

$$q_{\text{п-м}}^{\text{излу}} = 5.67 \varepsilon_{\text{м}} \left(\varepsilon_{\text{п}} (1 - \varepsilon_{\text{г.п}}) \frac{l_{\text{п2}}}{l_{\text{м}}} \left(\frac{t_{\text{п}}}{100} + 2.73 \right)^4 - \varepsilon_{\text{м}} \left(\frac{t_{\text{п}}}{100} + 2.73 \right)^4 \right) l_m \quad (3.308)$$

12.9 Тепловой поток излучением от газа к материалу, Вт/м (3.309)

$$q_{\text{г-м}}^{\text{излу}} = 5.67 \frac{\varepsilon_{\text{м}} + 1}{2} \left(\varepsilon_{\text{г}} \left(\frac{t_{\text{г.ср}}}{100} + 2.73 \right)^4 - \varepsilon_{\text{г.м}} \left(\frac{t_{\text{м.ср}}}{100} + 2.73 \right)^4 \right) l_m \quad (3.309)$$

12.10 Конвективный тепловой поток от газа к материалу, Вт/м (3.310)

$$q_{\text{г-м}}^{\text{КОНВ}} = \alpha_k (t_{\text{г.ср}} - t_{\text{м.ср}}) l_m \quad (3.310)$$

где α_k – коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(м²·К).

12.11 Коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности печи в окружающую среду, Вт/(м²·К) (3.311)

$$\alpha_{\text{ос}} = 7.7 + (1 + 0.001 t_k) + 5.67 \varepsilon_k \frac{\left(\frac{t_k}{100} + 2.73 \right)^4 - \left(\frac{t_{\text{ос}}}{100} + 2.73 \right)^4}{t_k - t_{\text{ос}}} \quad (3.311)$$

12.12 Тепловой поток в окружающую среду, Вт/м (3.312)

$$q_{\text{ос}} = 2\pi \left(\frac{1}{\lambda_{\text{об}}} \ln \frac{D - 2s_{\phi}}{D - 2(s_{\phi} + s_{\text{об}})} + \frac{1}{\lambda_{\phi}} \ln \frac{D}{D - 2s_{\phi}} + \frac{2}{\alpha_{\text{ос}} D} \right)^{-1} (t_p - t_{\text{ос}}) \quad (3.312)$$

12.13 Температура внутренней поверхности печи, °С

$$t_p = \sqrt[4]{\frac{k_3 - k_2 t_p}{k_1}} - 273 \quad (3.313)$$

$$k_1 = 5,67 \varepsilon_p [\varepsilon_m (1 - \varepsilon_{g,m}) l_M + \varepsilon_{g,m} l'_p] \cdot 10^{-8} \quad (3.314)$$

$$k_2 = l''_p \alpha_k \quad (3.315)$$

$$k_3 = 5,67 \varepsilon_p \varepsilon_g \left(\frac{t_r}{100} + 2,73 \right)^4 l'_p + l'_p t_r \alpha_k + 5,67 \varepsilon_m \varepsilon_p \left(\frac{t_M}{100} + 2,73 \right)^4 (1 - \varepsilon_{g,p}) l_M - q_{oc} - q_{п.м}^T \quad (3.316)$$

где l'_p – открытая длина внутренней поверхности футеровки, м,

l''_p – длина внутренней поверхности под материалом, м,

ε_p – степень черноты внутренней поверхности футеровки, безразмерный,

ε_m – степень черноты материала, безразмерный.

Шаг 13 – Длина зоны (3.317)

$$L = \frac{G_{\text{спек}}}{3,6} \frac{H_{G,1}^{\Sigma} - H_{G,2}^{\Sigma}}{q_{Г-М}^{\text{конв}} + q_{Г-М}^{\text{излуч}} + q_{Г-П}^{\text{конв}} + q_{Г-П}^{\text{излуч}}} \quad (3.317)$$

где $G_{\text{спек}}$ – производительность печи по спеку, кг/ч

$q_{Г-М}^{\text{конв}}$ – конвективный тепловой поток от газа к материалу, Вт/м,

$q_{Г-М}^{\text{излуч}}$, лучистый тепловой поток от газа к материалу, Вт/м

$q_{Г-П}^{\text{конв}}$, конвективный тепловой поток от газа к футеровке, Вт/м

$q_{Г-П}^{\text{излуч}}$, лучистый тепловой поток от газа к футеровке, Вт/м.

Результатом расчета тепловой модели и всей комплексной модели в общем является получение температурных профилей газа и материала (рисунок 3.25 и 3.26). Полученные результаты были верифицированы на данных из научной литературы, рассмотренных в первой главе.

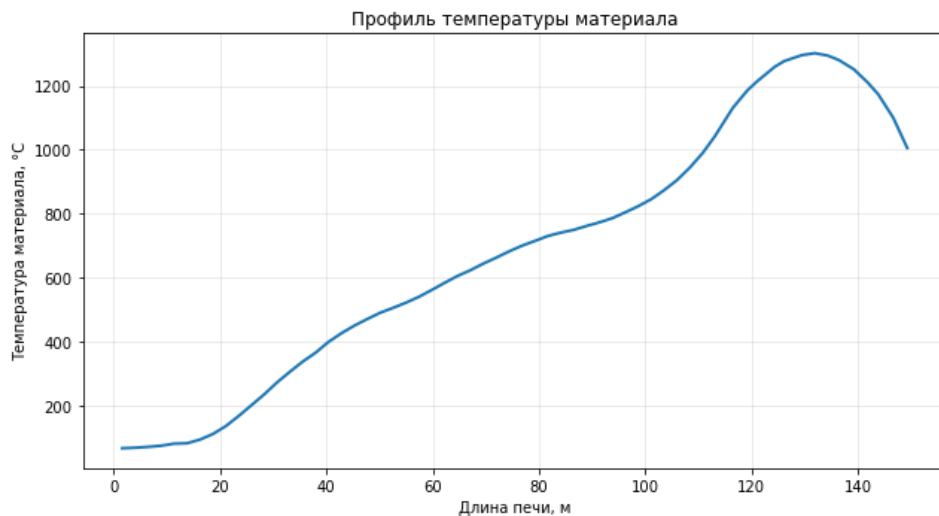


Рисунок 3.25 – Температурный профиль материала (составлено автором)

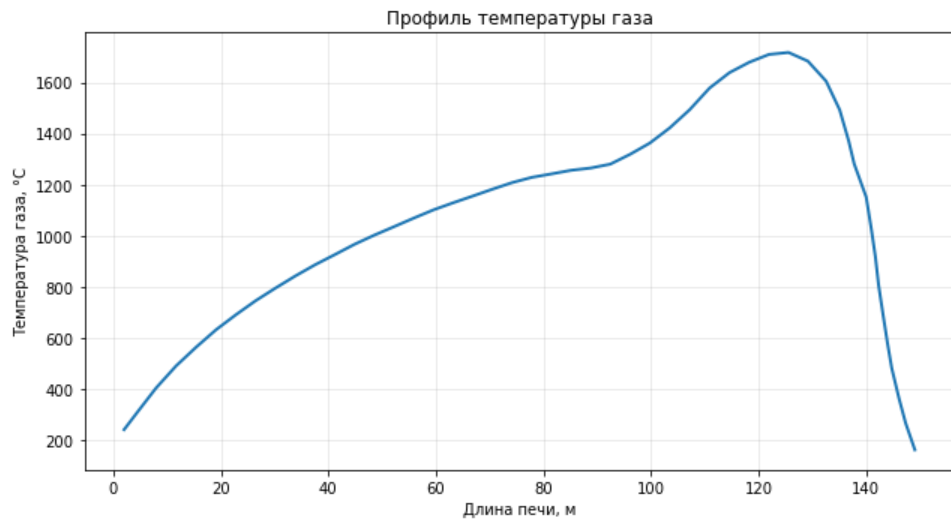


Рисунок 3.26 – Температурный профиль газа (составлено автором)

3.8 Выводы по главе 3

В данной главе предложены структура и алгоритм расчета комплексной прогнозной модели процесса спекания нефелинового концентрата с известняком в трубчатой вращающейся печи. Модель разработана как составная часть системы усовершенствованного управления технологическим процессом и предназначена для расчета температурного профиля газа и материала, оценки изменения состава шихты по длине агрегата, а также определения показателей, характеризующих эффективность процесса спекания.

Рассмотренная комплексная модель объединяет несколько взаимосвязанных расчетных блоков: модель осевого движения материала, учитывающую изменение формы рабочего пространства печи; модель пылеуноса и пылеосаждения; модель горения факела; модель теплообмена в цепной зоне; модель химических превращений; модель теплообмена в зонах без внутренних теплообменных устройств. Такая структура позволяет учитывать основные физические, тепловые и химические процессы, протекающие в трубчатой вращающейся печи, а также их взаимное влияние при расчете технологического состояния агрегата.

Особенностью предложенного алгоритма является последовательное использование результатов одних подмоделей в качестве исходных данных для других. Так, модель осевого движения материала определяет профиль высоты слоя и скорости перемещения материала по длине печи, что необходимо для расчета времени пребывания и протекания химических превращений. Модель пылеуноса и пылевозврата позволяет учесть изменение массы и состава материала вследствие уноса и осаждения пыли. Модель горения факела формирует температурный профиль газовой фазы и состав продуктов сгорания, используемые далее в расчетах теплообмена. Модели теплообмена в цепной зоне и в зонах без внутренних теплообменных устройств обеспечивают определение температур газа и материала с учетом

конвективного и лучистого теплообмена, теплопотерь в окружающую среду, испарения влаги и тепловых эффектов химических реакций.

В результате расчета комплексной модели определяется температурный профиль печи, изменение температуры материала по длине агрегата, состав газовой и твердой фаз, а также степень протекания основных химических превращений. На основе этих данных может быть рассчитан показатель извлечения глинозема из спека, что позволяет использовать модель не только для анализа текущего состояния объекта, но и для прогнозирования последствий изменения управляющих воздействий.

Разработанный алгоритм реализован на основе зонального подхода, при котором печь разбивается на отдельные расчетные участки, соответствующие конструктивным и технологическим особенностям агрегата. Для обеспечения согласования расчетной и фактической длины печи применяется итерационный расчет, в ходе которого корректируются параметры модели до достижения заданной точности. Такой подход обеспечивает возможность применения модели в составе программного модуля системы управления и позволяет адаптировать расчет к изменяющимся условиям работы печи.

Таким образом, в главе обоснована структура комплексной прогнозной модели ТВП и показана взаимосвязь ее основных расчетных блоков. Предложенная модель учитывает влияние формы рабочего пространства, движения материала, пылеобразования, горения топлива, теплообмена и химических превращений на формирование температурного режима печи. Модель верифицирована на производственных данных представленных в научной литературе и может быть использована в качестве составной части системы усовершенствованного управления.

ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПРОГНОЗНОЙ МОДЕЛИ И ЭКСПЕРТНОЙ БАЗЫ ПРАВИЛ

4.1 Система управления

4.1.1 Описание структуры

Основной целью данной главы является продемонстрировать применимость разработанной математической модели для управления процессом спекания нефелино-известняковой шихты, а также оценить предполагаемую экономическую эффективность применения рассматриваемой системы.

Предлагаемая экспертная система управления интегрируется в классическую трехуровневую систему АСУТП на уровень SCADA системы в виде отдельного программного обеспечения. Структуру экспертной системы управления можно разделить на два режима работы и пять структурных блоков (рисунок 4.1).



Рисунок 4.1 – Схема взаимосвязи модулей СУУ ТП (составлено автором)

Первый режим работы (Нормальный режим работы) предполагает функционирование в рабочем режиме. В данном режиме не предполагается остановки печи или перехода на «тихий ход», а основной задачей в данном режиме является стабилизация режимных параметров объекта.

Второй режим работы (Аварийный режим работы) предполагает срабатывания одной из аварийных ситуаций, требующих изменения режима работы печи. Основной задачей данного режима является скорейший выход из аварийной ситуации и недопущения повреждения конструкции объекта управления.

Выводом системы в обоих случаях является текстовый алгоритм действий для оператора.

Оба режима функционируют параллельно, поэтому если аварийная ситуация происходит во время расчёта модельного блока, то на выход экспертной системы управления незамедлительно должна поступить информация для оператора из аварийного режима работы.

В нормальном режиме работы участвуют два структурных блока экспертной системы: экспертная база правил и прогнозная модель. На основе правилами нечёткой логики [145], а также на основе подхода описанного в работе [42] трубчатая вращающаяся печь разбивается на два участка: холодный конец печи и горячий конец печи. Для каждого участка определен набор целевых параметров, значения которых фазифицируются и с помощью базы правил приводятся к общей лингвистической переменной, характеризующие состояние данной зоны - «состояние участка». В зависимости от зоны и её состояния выбираются управляющие воздействия и направления их изменения. После чего данная информация поступает в комплексную прогнозную модель, где производится выбор конкретного значения изменения управляющего параметра, путем расчёта математической модели, алгоритм расчёта которой описан в третьей главе.

Параметры математической модели корректируются раз в 2-4 часа на основе лабораторных анализов параметров, описанных в первой главе.

Такой подход в отличии от работы [42], в которой воздействие выбиралось по средствам дефазикации, позволяет устранить ошибки, которые могут быть вызваны неточным заданием нечетких множеств и функций принадлежности для управляющих параметров, что вызывает значительную сложность при экспертной оценке. Границы нечётких множеств для целевых переменных в рассматриваемой главе выбирались на основе технологического регламента предприятия, априорных знаний о процессе, рассмотренных в первой главе литературных источниках и консультаций с операторами ТВП. Следует отметить, что выбранные границы не являются универсальными и необходима корректировка для каждой отдельной печи в соответствии с её регламентными значениями, техническим состоянием и особенностями конструкции.

4.1.2 Целевые и управляющие параметры

Печь разделяется на две зоны для каждой из которых был определен набор целевых параметров, по которым можно судить о тепловом состоянии рассматриваемой зоны, и набор управляющих параметров, которые более всего коррелируют с параметрами данной зоны и внесут наименьшее возмущение в другие зоны печи.

Зона декарбонизации является наиболее напряженной в теплотехническом отношении и процессы в ней протекающие во многом обуславливают успешность дальнейшего процесса спекания, однако материалы работы [27] показывают, что температура материала в зоне

декарбонизации во многом зависит от температуры газа после цепной зоны. Поэтому зону декарбонизации можно исключить из рассмотрения, а состояние холодного конца печи можно однозначно идентифицировать по температуре газа на выходе из печи и температуре газа после цепной завесы. Выбранные параметры представлены в виде таблицы 4.1.

Таблица 4.1 – Целевые и управляющие параметры выделенных зон печи (по данным автора)

Название зоны	Целевые параметры	Управляющие параметры
Холодный конец печи	Температура отходящих газов, Температура материала после цепной зоны	Положение шиберы дымососа, Положение дроселя, Положение лопаток, Положение горелки, Расход топлива
Горячий конец печи	Температура материала на выходе из печи	Расход технологической пыли

Целевые и управляющие параметры в таблице были выбраны на основе материалов из литературных источников, а также на основе исследования разработанной модели процесса, рассмотренной в третьей главе. В работе [27] отмечается высокая корреляция между температурой газа после цепной завесы и степенью извлечения глинозема, а исследования на модели представленной в третьей главе данной работы показывают высокую корреляцию между температурой отходящих газов и температурой материала в холодном конце печи, что согласуется с результатами [36]. Исследования в третьей главе данной работы показали значительную корреляцию между длиной факела и температурой газов после цепной завесы. Более того использование геометрии факела в качестве управляющего параметра позволяет корректировать распределение температуры внутри печи при этом не изменяя температуру отходящих газов, а значит и тепловое КПД самого объекта. Расход топлива предполагается использовать в качестве управляющего параметра только при высоких отклонениях от нормы, а основное управляющее воздействие на холодный конец предполагается осуществлять за счёт изменения положения шиберы и геометрии факела, что согласуется с ранее отмеченными ограничениями в первой главе данной работы.

Касательно же используемых управляющих параметров необходимо дать комментарий. Расход топлива и расход пыли напрямую задаётся в математической модели и оператором печи в SCADA-системе, однако с другими параметрами необходимо рассмотреть связь между параметрами, с которыми работает оператор и модельными параметрами. Положение шиберы дымососа влияет на количество увлекаемого в печь воздуха и таким образом регулирует тягодутьевой режим печи и количество теплоты, поступающей в холодный конец печи. Однако между показаниями приборов, фиксирующих открытие регулирующего шиберы и производительностью дымососа нет линейной зависимости [42]. Поэтому необходим подход, который позволит сопоставить результаты расчёта математической модели с показаниями реальных приборов. Для решения данной задачи использован подход, описанный в работе [42].

А именно то что о количестве отсасываемых газов можно судить по разрежению в пылеосадительной камере, а данный параметр измеряется непрерывно и связан математической зависимостью с количеством газов [42] (4.1):

$$P_{\text{пк}} = \left(\frac{V_g}{k_v}\right)^2 \quad (4.1)$$

где $P_{\text{пк}}$ – разрежение в пылеосадительной камере, кПа,

V_g – объем отходящих газов, м³,

k_v – коэффициент режима печи, учитывающий изменение плотности газов от температуры по длине печи, внутренние сужения, обусловленные конструкцией печи, образование колец и обмазки, а также конструкцию и состояние цепной завесы.

Так как вычисления управляющего воздействия происходит за сравнительно небольшой промежуток времени, то коэффициент можно принять постоянным и рассчитать, выразив из уравнения 4.1.

Таким образом, можно вычислять величину управляющего воздействия. Следует отметить, что при выборе управляющего воздействия необходимо поддерживать коэффициент избытка воздуха в заданном диапазоне, так как невыполнение данного условия повлечёт дополнительные эксплуатационные трудности и экономические убытки, такие как повышенные пылевынос или перерасход топлива.

Схожая ситуация также наблюдается и для положения дросселя горелки, положения лопаток завихрителя горелки и положения форсунки – эти управляющие элементы используются в горелках типа ВРГ, которая и установлена на рассматриваемом объекте. Для моделирования влияния данных управляющих параметров необходимо использовать численные методы CFD, однако такой подход на сегодняшний день невозможен в системах управления. Вместо это предлагается использовать подход на основе нечёткой логики описанный в работе [42]. В частности, следует использовать параметр «характер горения и профиль факела», так как все элементы конструкции любых горелок и форсунок предназначены для обеспечения одной и той же задачи. Лингвистическая переменная «характер горения и профиль факела» имеет следующие значения:

- Интенсивное горение, сконцентрированный факел – L;
- Нормальный режим горения, рациональный факел – N;
- Слабая интенсивность горения, растянутый факел – H;
- Очень слабая интенсивность горения, сильно растянутый факел – HH;

Косвенно оценить длину факела в работе предлагается на основе расстояния от горячего конца печи до точки максимальной температуры корпуса. Данный параметр определяется непрерывно и может быть рассчитан в математической модели. Учёт влияние регулирующих

органов планируется производить через поправочный коэффициент, который уже обсуждался в 3 главе данной работы (3.91). Так, по средствам промышленных испытаний и численного моделирования можно установить значения коэффициента характерные для сочетания значений регулирующих параметров горелки. В таком случае длина факела будет как рассчитываться по аналитической модели, так и корректироваться с учётом особенностей устройства горелки и положения регулирующих органов, что позволит использовать аналитическую модель, не прибегая к численному моделированию процесса горения. Температура же стенки рассчитывается в подмодели теплообмена в зонах без внутренних теплообменников, поэтому данный параметр не требует корректировки. Предлагаемые далее функции принадлежности и границы основаны на анализе расчётов математической модели факела из третьей главы, и при практической реализации на реальном объекте потребуют обязательно корректировки для конкретного печного агрегата.

Для описания регулирующих органов ВРГ используются следующие лингвистические переменные:

- X_1 – Положение дросселя подачи;
- X_2 – Положение лопаток завихрителя;
- X_3 – Осевое положение горелки.

Все три переменных приводятся к безразмерному виде в диапазоне $[0;1]$, где значения 0 и 1 соответствуют минимальному и максимальному допустимым положениями исполнительных механизмов. При это каждая лингвистическая переменная имеет пять лингвистических значений: «LowLow (LL)», «Low (L)», «Normal (N)», «High (H)», «HighHigh (HH)».

Фаззификация входных параметров осуществляется с использованием треугольных и трапецеидальных функций принадлежности. Такой выбор обусловлен механической природой исполнительных механизмов и обеспечивает линейную чувствительность системы вблизи номинальных режимов при насыщении в крайних положениях.

Для каждого входного параметра задаётся пять функций принадлежности, соответствующих указанным лингвистическим термам. Крайние состояния (LL и HH) описываются трапецеидальными функциями с плато, отражающими насыщение исполнительных механизмов, а промежуточные состояния – треугольными функциями. Границы состояний для каждой переменной приведены в таблице 4.2 и на рисунках 4.2 – 4.4.

Таблица 4.2 – Диапазоны значения для лингвистических переменных, описывающих положение рабочих органов горелки печи (по данным автора)

Значение	X_1		X_2		X_3	
	min	max	min	max	min	max
LL	0.0	0.25	0.0	0.3	0.0	0.35
L	0.1	0.4	0.15	0.45	0.2	0.5

Продолжение Таблицы 4.2

Значение	X ₁		X ₂		X ₃	
	min	max	min	max	min	max
N	0.3	0.7	0.35	0.65	0.4	0.6
H	0.6	0.9	0.55	0.85	0.5	0.8
HH	0.75	1	0.7	1	0.65	1

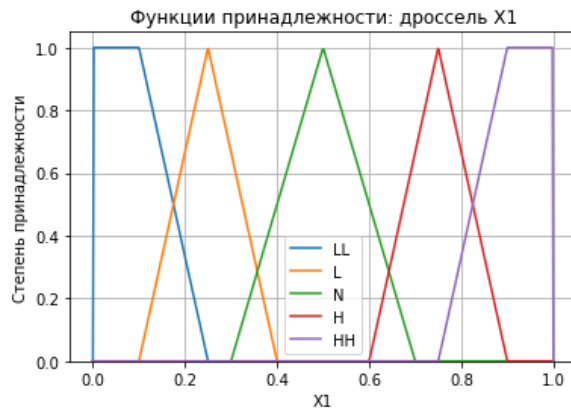


Рисунок 4.2 – Функции принадлежности положения дросселя горелки (составлено автором)

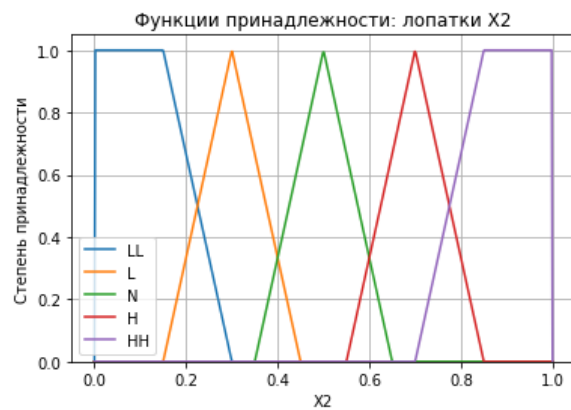


Рисунок 4.3 – Функции принадлежности положения лопаток завихрителя (составлено автором)

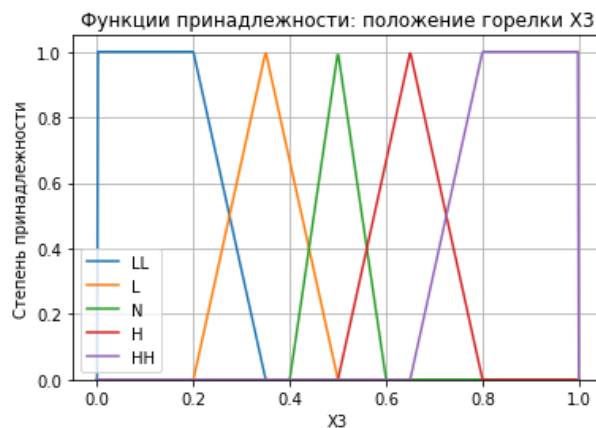


Рисунок 4.4 – Функции принадлежности положения горелки (составлено автором)

После фаззификации значений положений регулирующих органов в безразмерном виде, идёт проверка правил (таблица 4.3), каждое из которых представляет собой операцию минимум, что соответствуют конъюнкции в логике Мамдани.

Таблица 4.3 – Правила нечеткой логики для определения состояния факела на основе положения регулирующих органов (по данным автора)

X_1	X_2	X_3	X_ϕ
НН	LL	НН	НН
НН	L	Н	НН
Н	L	Н	Н
Н	N	Н	Н
Н	Н	N	N
N	L	Н	N
N	N	N	N
N	Н	L	L
L	Н	L	L
L	НН	LL	LL
LL	НН	LL	LL
LL	L	L	LL
L	N	L	L
N	LL	N	Н
N	НН	N	L

После чего производится дефазификация методом взвешенного среднего. Для интерпретации результатов нечёткого вывода введена нормированная шкала состояния факела, границы которой заданы в виде перекрывающихся интервалов. Каждому лингвистическому состоянию соответствует диапазон значений выходной переменной, а также рекомендуемый диапазон значений поправочного коэффициента математической модели (таблица 4.4). Такая схема позволяет напрямую использовать результаты экспертной оценки в модельном блоке системы управления.

Таблица 4.4 – Диапазоны состояния факела (по данным автора)

Состояние факела	X_ϕ		k_ϕ
	min	max	
LL	0.0	0.35	0.53
L	0.3	0.5	0.63
N	0.45	0.55	0.7
Н	0.55	0.8	0.82
НН	0.75	1	0.88

Также следует дать комментарий об используемых целевых параметрах для описания температурного состояния зон. При выборе параметров для холодного конца печи анализировались статистические данные представленные в работе [36]. Данные параметры исчерпывающе описывают тепловое состояние данной зоны печи. С горячей зоной печи при выборе целевых параметров для предлагаемой методики главным ограничением является малое количество контролируемых параметров непосредственно в зоне факела из-за высоких температур и других физических особенностей процесса. Рассматривался вариант использования в качестве второго целевого параметра горячего конца печи – нагрузку на привод печи, которая меняется из-за изменения угла динамического откоса материала в зоне спекания и как следствие

изменения центра тяжести в поперечном срезе печи. Однако в рамках литературного обзора, рассмотренного в первой главе данной работы, не удалось найти каких-либо математических зависимостей, связывающих нагрузку на привод с технологическими процессами, а также в имеющихся регламентных значениях отсутствуют номинальные значения данного параметра. Кроме того, при консультации с оператором цементного производства было отмечено, что операторы действительно используют данный параметр для анализа состояния зоны спекания, однако в большинстве случаев они анализируют скорость и направление его изменения, а не его текущее значение. Таким образом, для использования данного параметра в предлагаемой системе управления необходимо установить математическую зависимость нагрузки на привод или скорости её изменения с технологическими процессами, что выходит за границы данной работы, поэтому данный параметр в предложенной системе управления используется исключительно для определения аварийных ситуаций, такой как обрушение значительной части обмазки, которая приводит к резкому повышению нагрузки на привод.

С учётом всего вышеописанного в данном подразделе таблицу целевых и управляющих параметров выделенных зон печи можно представить в виде таблицы 4.5.

Таблица 4.5 – Целевые и управляющие параметры выделенных зон печи (по данным автора)

Название зоны	Целевые параметры	Управляющие параметры
Холодный конец печи	Температура отходящих газов, Температура газов после цепной зоны	Разряжение в пылесадительной камере, Состояние факела, Расход топлива
Горячий конец печи	Температура материала на выходе из печи	Расход технологической пыли

4.1.3 Степень принадлежности целевых параметров

Каждый из рассмотренных ранее целевых параметров системы представляет собой переменную, для фазификации которой необходимо задать диапазон значений, которые может принимать эта переменная, её заданное значение, после чего необходимо разделить диапазон значений на нечеткие подмножества. При этом каждое нечеткое подмножество представляет значение лингвистической переменной. Связь между нечеткими подмножествами лингвистической переменной и диапазоном возможных значений описывается функцией принадлежности, которая показывает определяет принадлежности числа к нечёткому множеству в виде числа в интервале $[0;1]$, в котором 0 – означает, что число не принадлежит нечёткому множеству, а 1 – полностью принадлежит нечёткому множеству. Целевые параметры зон в виде лингвистических переменных представлены в таблице. При этом множестве значений задано в форме относительно заданного значения, что позволяет использовать те же функции принадлежности при изменении заданного значения.

Интервалы задавались на основе производственных данных работ [27; 48; 68], а также консультации с операторами ТВП печей, анализа результатов расчёта разработанной математической модели и методологией работы [42] (таблица 4.6).

Таблица 4.6 – Нечёткие подмножества целевых параметров (по данным автора)

Название параметра	Нечёткие подмножества	Интервал соответствия численных значений и нечётких подмножеств	Заданное значение	Диапазон численных значений
Температура отходящих газов	Сильно понижена (LL)	-40...-10	240 °С	-40..40 °С (с шагом 5 °С)
	Понижена (L)	-10...-5		
	Норма (N)	-5..5		
	Повышена (H)	5...10		
	Сильно повышена (HH)	10...40		
Температура материала после цепной зоны	Сильно понижена (LL)	-50...-30	430 °С	-50..50 °С (с шагом 5 °С)
	Понижена (L)	-30...-10		
	Норма (N)	-10...10		
	Повышена (H)	10..30		
	Сильно повышена (HH)	30...50		
Температура материала на выходе из печи	Сильно понижена (LL)	-50...-30	1000 °С	-50..50 °С (с шагом 5 °С)
	Понижена (L)	-30...-10		
	Норма (N)	-10...10		
	Повышена (H)	10..30		
	Сильно повышена (HH)	30...50		

Для описания параметров было решено использовать функцию принадлежности, которая была использована в работе [42]. Также эта функция наилучшим образом описывала результаты экспертных опросов операторов трубчатых вращающихся печей АО «Осколцемент», которые проводились К.Н. Смысловым в 1988 [42], а также использовалась в работах [11; 12; 23].

Для вычисления функции потребуются следующие параметры: a и b – границы нечеткого множества, а также значение c_0 – значение при котором степень принадлежности к данному нечеткому множеству будет равна 1. В данном случае c_0 вычислялось как среднее в рассматриваемом множестве, однако при реализации на конкретном промышленном агрегате это значение может смещать от центра диапазона.

Функция принадлежности вычисляется следующим образом (4.2, 4.3) [42]:

$$c_0 = \frac{a_0 + b_0}{2} \quad (4.2)$$

где a_0 – левая граница заданного интервала,

b_0 – правая граница заданного интервала,

c_0 – значение, соответствующее центру интервала, в котором степени принадлежности равна 1.

$$\mu_s(x') = \begin{cases} e^{\frac{2}{|x'_1 - x'_2|} \ln\left(\frac{1}{2}\right) |x' - c_0|}, & \text{если } x' \leq c_0 \\ e^{\frac{2}{|x'_3 - x'_4|} \ln\left(\frac{1}{2}\right) |x' - c_0|}, & \text{если } x' > c_0 \end{cases} \quad (4.3)$$

где x' – значение параметра,

x'_1, x'_4 – значение, соответствующее степени принадлежности 0.5,

x'_2, x'_3 – значения, симметричные x'_1 , и x'_4 относительно a и b .

Параметры x_1, x_2, x_3, x_4 рассчитывались следующим образом (4.4):

$$x'_1 = \begin{cases} a_0 - 0.5(a_0 - b_l), & \text{если } b_l \leq a_0; \\ a_0, & \text{если } b_l > a_0; \end{cases} \quad x'_2 = a_0 + b_0 - x'_1 \quad (4.4)$$

$$x'_4 = \begin{cases} b_0 - 0.5(a_n - b_0), & \text{если } b_0 \geq a_n; \\ b_0, & \text{если } b_0 < a_n; \end{cases}$$

где a_n и b_n – значение границ правого соседнего интервала,

a_l и b_l – значение границ левого интервала.

У крайнего интервала отсутствует один из соседей, поэтому значение степени принадлежности на этом участке принимается равной 1.

По описанным формулам были получены следующие степени принадлежности для целевых параметров (рисунок 4.5 – 4.7).

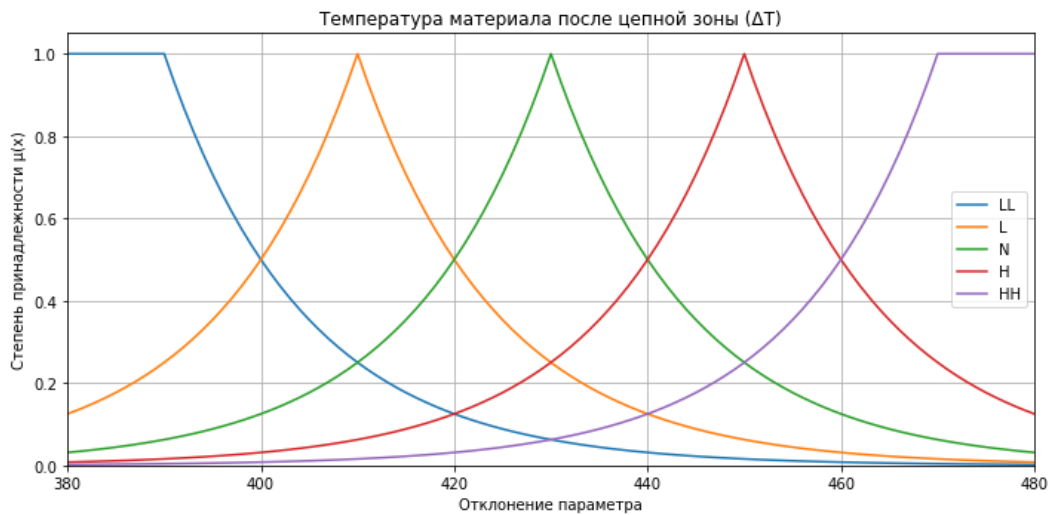


Рисунок 4.5 – Степень принадлежности температуры материала после цепной зоны
(составлено автором)

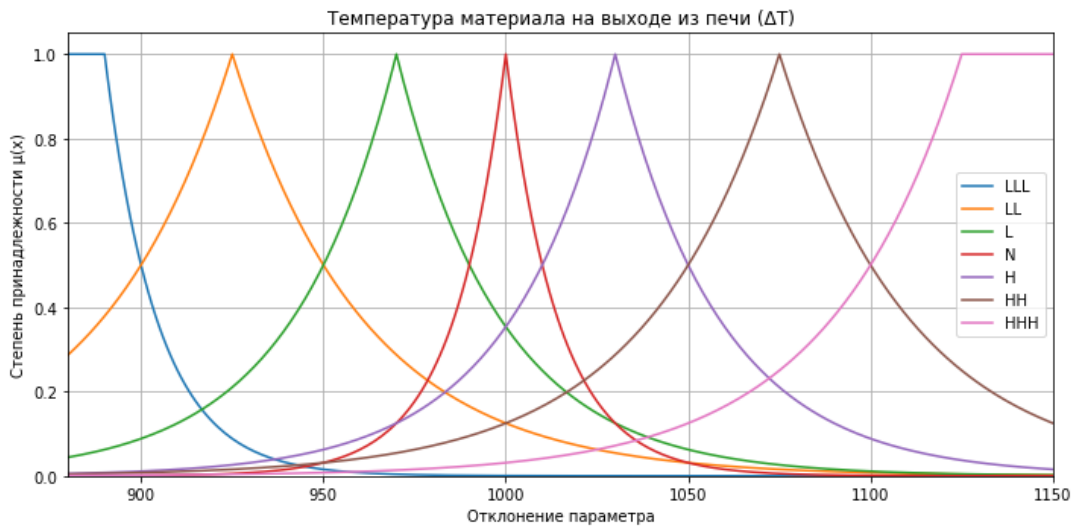


Рисунок 4.6 – Степень принадлежности температуры материала на выходе из печи (составлено автором)

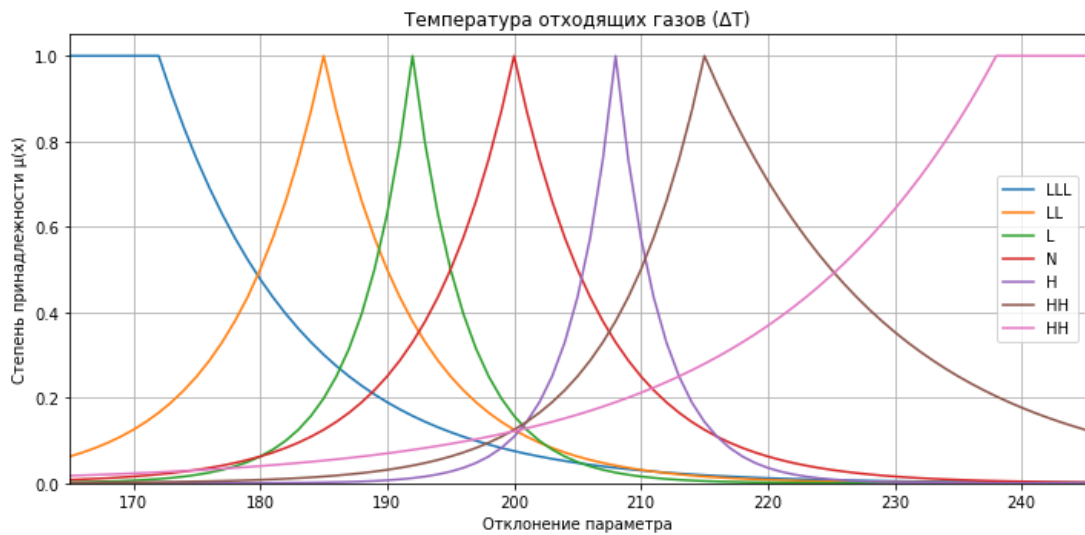


Рисунок 4.7 – Степень принадлежности температуры отходящих газов (составлено автором)

Управляющие параметры не требуют фаззификации, так как их значение определяется на основе расчётов разработанной математической модели процесса.

4.1.4 Оценка состояния зоны печи

Печь для спекания нефелинового концентрата с известняком предполагается разделить на две зоны, тепловое состояние каждой из которых оценивается независимо на основе выбранных целевых параметров по теории нечеткой логики. Каждая зона характеризуется лингвистической переменной «Состояние зоны», отражающей её тепловое состояние. Для описания состояния зон была использована методология предложенная в работе [42]. При этом данная лингвистическая переменная может принимать значения, указанные в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Значение лингвистической переменной «Состояние зоны» (по данным автора)

Обозначение	Значение лингвистической переменной «Состояние зоны»
LL	Остыла
L	Немного остыла
N	В норме
H	Немного перегрета
HH	Перегрета

Для определения значения лингвистической переменной «состояние зоны» на основе расчетов модели, описанной в третьей главе и промышленных данных представленных в [27; 48; 68], а также консультациях с операторами трубчатых вращающихся печей была сформирована база правил, каждое из которых представляет собой операцию минимум, что соответствуют конъюнкции в логике Мамдани (таблица 4.8).

Таблица 4.8 – Правила нечеткой логики для определения состояния горячей зоны (по данным автора)

Температура материала на выходе из печи	Состояние горячего конца печи
LL	LL
L	L
N	N
H	H
HH	HH

Рассмотрим пример определения состояния горячей зоны. Значение температуры материала на выходе из печи равно 1025 °С. Данное значение фазифицируется (рисунок 4.8). После чего на основе базы правил нечеткой логики (таблица 4.8) определяется состояние горячего конца печи (рисунок 4.9).

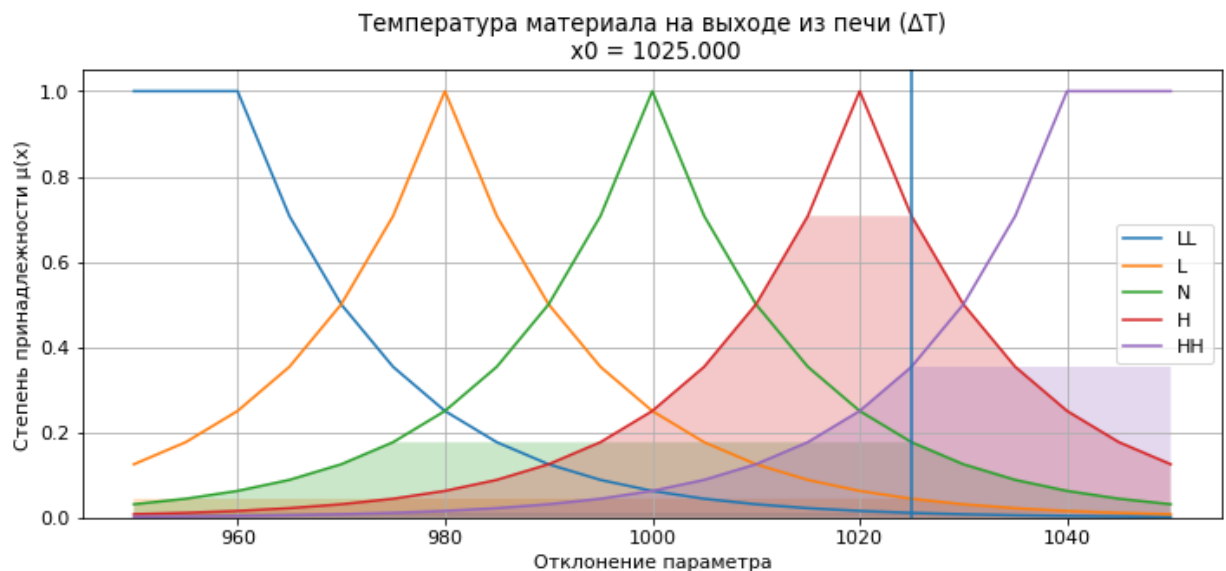


Рисунок 4.8 – Фаззификация температуры материала на выходе из печи (составлено автором)



Рисунок 4.9 – Определение состояния горячего конца печи (составлено автором)

Зависимость можно представить в виде графика на рисунке 4.10.



Рисунок 4.10 – Зависимость состояния горячего конца печи от температуры материала на выходе (составлено автором)

Аналогичным образом определяется состояния холодного конца печи, с тем исключением, что для его определения используются два целевых параметра. Базу правил для холодного конца печи можно представить в виде таблицы 4.9.

Таблица 4.9 – Правила нечеткой логики для холодного конца (по данным автора)

Температура отходящих газов	Температура материала после цепной зоны	Состояние холодного конца печи
LL	LL	LL
LL	L	LL
L	LL	LL
LL	N	L
L	L	L
N	LL	L

Продолжение Таблицы 4.9

Температура отходящих газов	Температура материала после цепной зоны	Состояние холодного конца печи
L	N	N
N	L	N
N	N	N
H	L	N
L	H	N
N	H	H
H	N	H
H	H	H
HH	N	H
N	HH	H
H	HH	HH
HH	H	HH
HH	HH	HH

Рассмотрим пример определения состояния холодного конца печи. Значение температуры отходящих газов равно 250 °С, а значение температуры материала после цепной зоны составляет 440 °С. Данные значения фазифицируются (рисунок 4.11, рисунок 4.12). После чего на основе базы правил нечеткой логики (таблица 4.9) определяется состояние горячего конца печи (рисунок 4.13). Зависимость состояния печи от значения целевых параметров можно представить с помощью поверхности (рисунок 4.14)

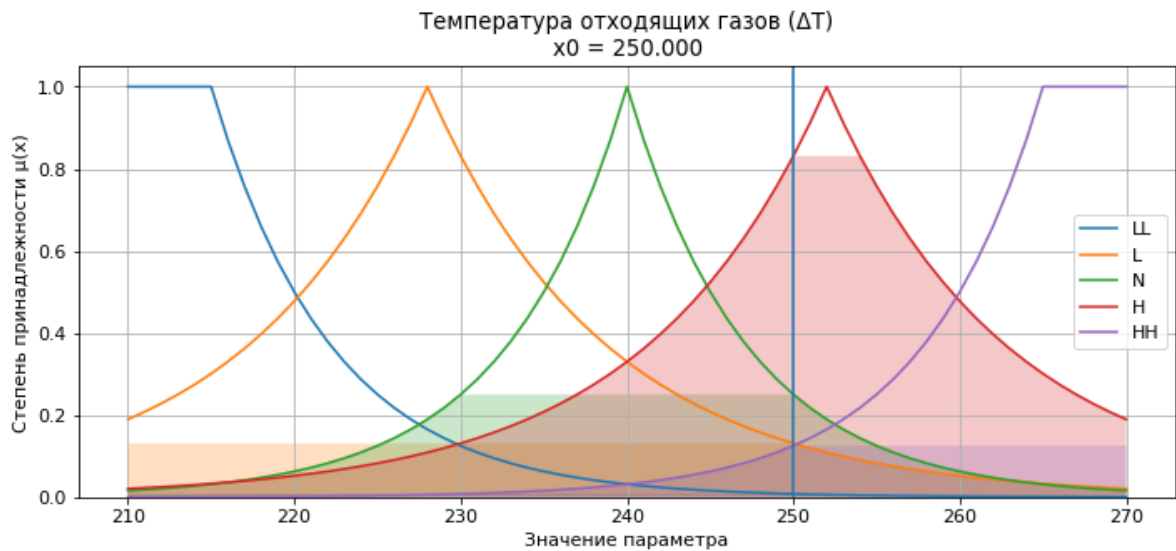


Рисунок 4.11 – Фазификация температуры отходящих газов (составлено автором)

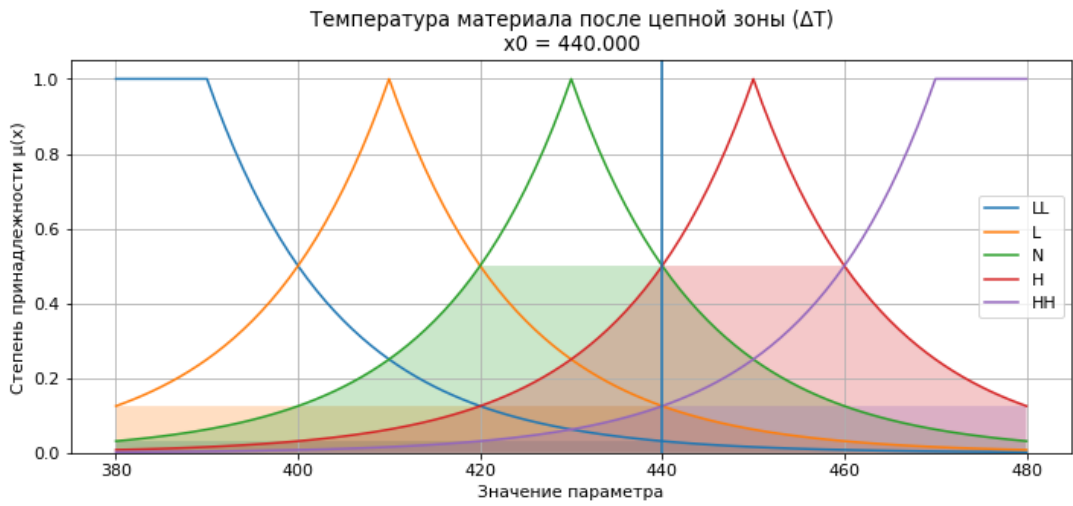


Рисунок 4.12 – Фаззификация температуры материала после цепной зоны (составлено автором)

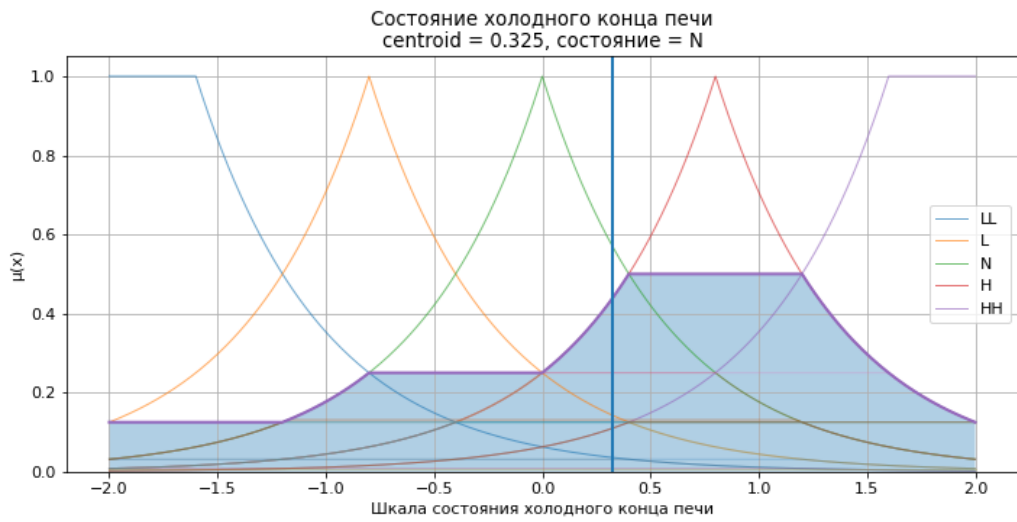


Рисунок 4.13 – Определение состояния холодного конца печи (составлено автором)

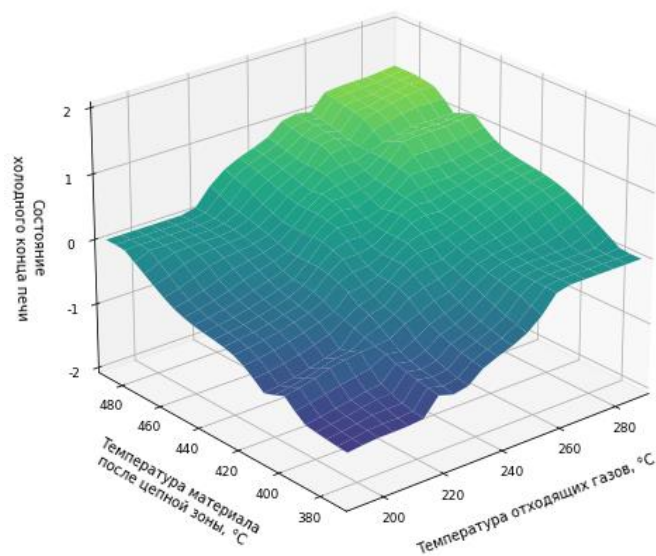


Рисунок 4.14 – Зависимость состояния горячего холодного печи от целевых параметров (составлено автором)

4.1.5 Определение управляющего воздействия

После того как было идентифицировано состояние обоих концов печи, для каждого из них выбирается управляющее воздействия и направление их изменения согласно таблицам 4.10 и 4.11.

Таблица 4.10 – Выбор управляющего воздействия и направления его изменения для горячего конца печи (по данным автора)

Состояние зоны горячего конца печи	Расход пыли
LL	уменьшить
L	уменьшить
N	не изменять
H	увеличить
HH	увеличить

Таблица 4.11 – Выбор управляющего воздействия и направления его изменения для холодного конца печи (по данным автора)

Состояние зоны	Разрежение в пылесадительной камере	Состояние факела	Расход топлива
LL	не изменять	не изменять	увеличить
L	увеличить	увеличить	не изменять
N	не изменять	не изменять	не изменять
H	уменьшить	уменьшить	не изменять
HH	не изменять	не изменять	уменьшить

Определение конкретной величины изменения управляющего воздействия выполняется путем оптимизационного расчета на основе комплексной прогнозной модели, описанной в третьей главе. Для поиска оптимального значения управляющего воздействия используется метод Нелдера–Мида, не требующий вычисления градиентов целевой функции. В процессе расчета производится последовательный подбор величины корректирующего воздействия, при котором достигается минимальное отклонение прогнозируемых показателей процесса от заданных значений. После этого полученное значение используется для формирования рекомендации по изменению управляющего воздействия на объект управления.

4.1.6 Аварийный режим работы

На основе анализа научной литературы, производственного регламента предприятия и консультаций с операторами были выделены девять наиболее распространенных нештатных ситуаций. Для каждой из них сформированы комплексы диагностических признаков и рекомендуемых действий оператора, направленных на оперативное устранение аварийной ситуации и предотвращение повреждения оборудования. При необходимости система предполагает возможность добавления новых аварийных ситуаций. Рассмотренные ситуации приведены в виде таблицы Е.1 в приложении.

4.1.7 Оценка эффективности предлагаемой системы управления

Для оценки эффективности предлагаемого решения использовался метод имитационного сценарного моделирования работы печи в нормальном режиме. Рассматривались две группы сценариев: изменение возмущающих воздействий в выбранном диапазоне от номинального значения и сценарий «текущей ситуации», предполагающий нахождение объекта в определенном тепловом состоянии независимо от причин это вызвавших (таблица 4.12).

Таблица 4.12 – Сценарии с варьированием возмущающих параметров (по данным автора)

Варьируемые параметры	Изменение в % от номинального значения
Влажность шихты	±15%
Теплотворная способность топлива	±10%
Химический состав шихты	±3%
Насыпная плотность шихты	±10%

Для каждого параметра рассматривались четыре сценария: на границах интервалов и середине интервалов. Например, для влажности шихты рассматривались сценарии с отклонениями: +15%, +7.5%, -7.5%, -15%. Аналогично и для всех остальных параметров из таблицы 4.13.

Таблица 4.13 – Сценарии «текущей ситуации» (по данным автора)

Состояние холодного конца печи	Состояние горячего конца печи				
	LL	L	N	H	HH
LL	S1	S2	S3	S4	
L	S5	S6	S7	S8	
N		S9	S10	S11	S12
H			S13	S14	S15
HH				S16	S17

Из сценариев «текущей ситуации» было рассмотрено 17 наиболее вероятных комбинаций состояний холодного и горячего концов печи.

С учетом обеих групп всего было рассмотрено 33 сценария. всех рассмотренных сценариях система позволили вычислить корректно управляющие воздействие, стабилизировав температурный профиль и повысив степень извлечения глинозема из спека, которая рассчитывалась на основе модели химических превращений, описанной в третьей главе.

Для сопоставления использовались типовые показатели работы трубчатых вращающихся печей при штатном управлении, приведенные в литературных источниках [36]. Для каждого расчетного сценария предлагаемая система формировала корректирующие рекомендации по изменению управляющих воздействий. Расчет последующего состояния печи выполнялся на основе комплексной прогнозной модели, рассмотренной в третьей главе.

В качестве критериев эффективности использовались отклонение температуры горячего конца печи и расчетная степень извлечения глинозема. Первый параметр характеризуют

устойчивость температурного профиля печи, а последний – технологическую эффективность процесса спекания.

На рисунке 4.15 приведено сопоставление типовых показателей штатной эксплуатации печи с результатами расчета при использовании рекомендаций предлагаемой системы для наиболее неблагоприятного из рассмотренных сценариев. Под наиболее неблагоприятным сценарием понимается вариант, при котором действие возмущающих факторов приводит к максимальному отклонению температурного профиля и снижению технологических показателей процесса.

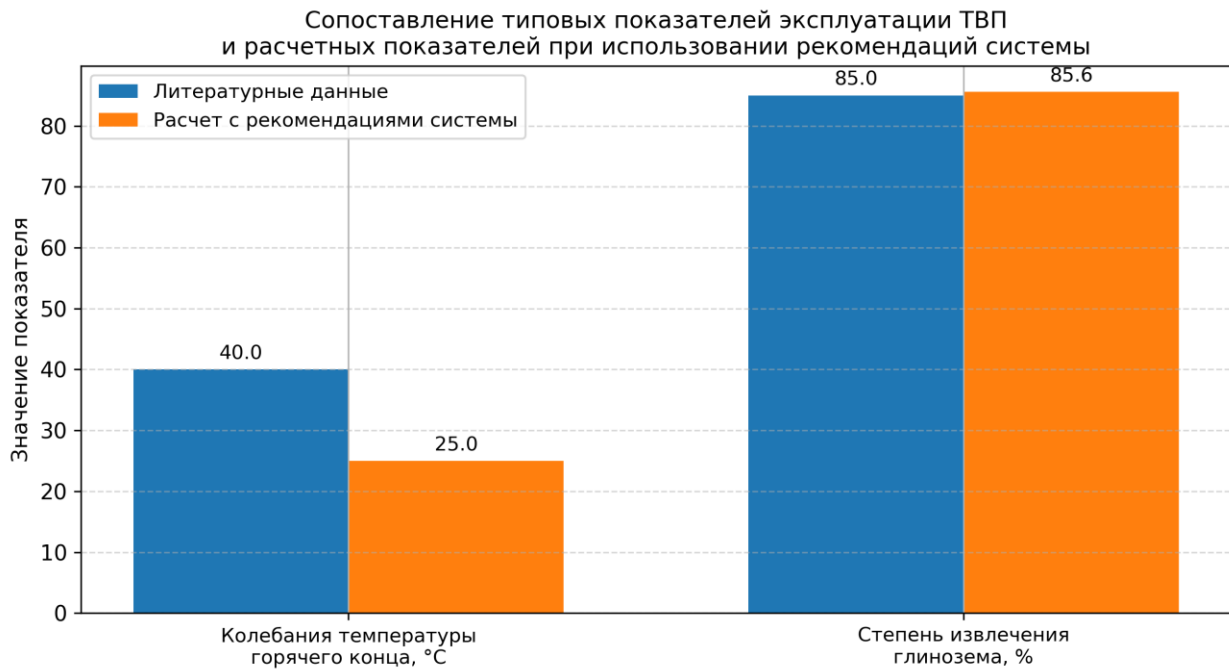


Рисунок 4.15 – Оценка эффективности системы управления (составлено автором)

Согласно литературным данным [36], в режиме штатной эксплуатации колебания температуры горячего конца печи могут достигать 40 °C, а степень извлечения глинозема составляет около 85 %. При использовании рекомендаций предлагаемой системы в наиболее неблагоприятном из рассмотренных сценариев расчетное отклонение температуры горячего конца печи было снижено, что указывает на стабилизацию теплового режима агрегата. Одновременно расчетная степень извлечения глинозема увеличилась на 0.6% и составила 85.6 %.

Полученные результаты подтверждают, что внедрение системы управления процессом спекания нефелинового концентрата в трубчатых вращающихся печах на основе экспертной базы правил и комплексной прогнозной модели позволяет стабилизировать режим работы ТВП и повысить расчетную степень извлечения глинозема не менее чем на 0.6% по сравнению с базовым уровнем штатной эксплуатации. Положение считается доказанным.

4.2 Выводы по главе 4

В данной главе разработана система усовершенствованного управления процессом спекания нефелинового концентрата в трубчатой вращающейся печи, основанная на совместном использовании комплексной прогнозной модели и экспертной базы правил. Показано, что предлагаемая система может быть интегрирована в существующую трехуровневую структуру АСУТП на уровне SCADA и функционировать в двух режимах: нормальном, предназначенном для стабилизации теплового режима агрегата, и аварийном, ориентированном на оперативную диагностику нештатных ситуаций и выдачу оператору рекомендаций по их устранению.

Для нормального режима работы сформирована структура принятия решений, включающая оценку состояния холодного и горячего концов печи на основе теории нечеткой логики. Обоснован выбор целевых и управляющих параметров для каждой зоны, заданы лингвистические переменные, функции принадлежности и базы правил, позволяющие интерпретировать текущее тепловое состояние печи в терминах, удобных для последующего формирования управляющих воздействий. Для холодного конца печи состояние определяется по температуре отходящих газов и температуре газов после цепной зоны, а для горячего конца - по температуре материала на выходе из печи. На основании идентифицированного состояния зоны предложены правила выбора направления изменения управляющих воздействий. Величина корректирующего воздействия определяется с использованием оптимизационного расчета по комплексной прогнозной модели.

Разработан аварийный режим работы системы, в рамках которого выделены наиболее характерные нештатные ситуации и сформированы соответствующие диагностические признаки и текстовые алгоритмы действий оператора.

Оценка эффективности предложенного подхода выполнена методом имитационного сценарного моделирования. Рассмотрены сценарии изменения возмущающих воздействий и наиболее вероятные комбинации состояний холодного и горячего концов печи; всего проанализировано 33 расчетных сценария. Результаты показали, что во всех рассмотренных случаях система корректно формирует рекомендации по изменению управляющих параметров, обеспечивая стабилизацию температурного профиля печи. Для наиболее неблагоприятного сценария установлено снижение расчетного отклонения температуры горячего конца печи с 40 до 25 °С, а также увеличение расчетной степени извлечения глинозема с 85.0 до 85.6 %.

Таким образом, результаты главы подтверждают, что использование системы усовершенствованного управления на основе экспертной базы правил и комплексной прогнозной модели позволяет повысить устойчивость теплового режима трубчатой вращающейся печи и улучшить технологические показатели процесса спекания.

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 помощью 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамов, В.Я. Исследование закономерностей работы цепных теплообменников: автореф. дис... канд. тех. наук: 05.00.00 / Абрамов, В.Я. -Л., 1966 -16 с.
2. Абрамов, В.Я.. Основные конструктивные характеристики вращающихся печей волховского алюминиевого и пикалевского глиноземного заводов для спекания нефелинсодержащих шихт / В.Я.. Абрамов, В.А.. Екимов, И.А.. Затуловский, Г.И.. Вертилецкий // Вращающиеся печи для спекания глиноземных (нефелиновых) шихт. – 1964. – Том. 2. – С. 63-76.
3. Абрамов, В.Я.. Основные конструктивные и технологические характеристики вращающихся печей Волховского алюминиевого и Пикалевского глиноземного заводов для спекания нефелинсодержащих шихт / В.Я.. Абрамов, В.А.. Екимов, И.А.. Затуловский, Г.И.. Вертилецкий // Вращающиеся печи для спекания. – 1964. – Том. 2. – С. 63-76.
4. Абрамов, В.Я.. Способы регулирования и поддержания заданного режима работы вращающихся печей / В.Я.. Абрамов, В.А.. Екимов, Э.Д. Рейфман // Вращающиеся печи для спекания глиноземных (нефелиновых) шихт. – 1964. – Том. 2. – С. 76-83.
5. Абрамов, В.Я.. Исследование процесса пылеосаждения и пылевынос по длине печи спекания пикалевского глиноземного завода / В.Я.. Абрамов, В.А.. Екимов, Э.В.. Сидорова // Вращающиеся печи для спекания глиноземных (нефелиновых) шихт. – 1964. – Том. 2. – С. 30-35
6. Абрамов, В.Я.. Выщелачивание алюминатных спеков / В.Я.. Абрамов, Н.И. Ерёмин. – 1976. – 207 с.
7. Авторское свидетельство 392317 (СССР). Способ автоматического регулирования процесса обжига строительных материалов во вращающихся печах. Ю.В. Горбушкин, Ю.И. Макаров, В.Я. Ратновский, Б.В. Скиба, В.Д. Левицкий, -опубл. В Б.И., 1973, №32.
8. Авторское свидетельство 58461 (СССР). Способ автоматического управления процессом обжига сырьевой смеси во вращающихся печах. Я.Е. Гельфанд, А.Д. Кацман, А.А. Первозванский, В.К. Савчков, В.И. Шидлович, -опубл. В Б.И., 1977, №48.
9. Авторское свидетельство 724902 (СССР). Способ управления процессом спекания материала во вращающихся печах. Г.М. Галанин, И.И. Лапаев, Ю.А. Ушаков, А.О. Чащин, А.Г. Староверов, В.П. Кузнецов, -опубл. В Б.И., 1980, №12.
10. Александров, А.В. Влияние модульных характеристик спека на извлечение глинозема при переработке нефелиновых руд / А.В. Александров, Н.В. Немчинова // Вестник ЮУрГУ. – 2022. – Том. 22. – С. 21-30. DOI: 10.14529/met220403.
11. Алиев, Р.А. Управление производством при нечёткой исходной информации / Р.А. Алиев, А.Э. Церковный, Г.А. Мамедова. – 1991. – 240 с.
12. Алиев, Р.А. Нечёткие модели и алгоритмы управления многостадийными ХТС в

условиях неполной информации / Р.А. Алиев, И.Р. Эфендиев, Ю.А. Абилов // Теоретические основы химической технологии. – 1986. – Том. 20. – № 1. – С. 120-124.

13. Арлюк, Б.И.. Определение теплоемкости компонентов глиноземных спеков / Б.И.. Арлюк // Труды ВАМИ. – 1967. – С. 5-8.

14. Арлюк, Б.И.. Расчет теплообмена во вращающихся печах / Б.И.. Арлюк, Э.М.. Ермолаева // Труды ВАМИ. – 1969. – Том. 65-66. – С. 97-105.

15. Арлюк, Б.И.. Процесс спекания в производстве глинозема / Б.И.. Арлюк, В.Е. Шнеер. – 1970. – 119 с.

16. Аронзон, В.Л.. Расчет движения материала во вращающейся печи на цифровой вычислительной машине / В.Л.. Аронзон, Е.И. Ходоров // Труды ВАМИ. – 1969. – Том. 65-66. – С. 112-120.

17. Аронзон, В.Л.. Номограммы расчета движения амтериала во вращающихся печах / В.Л.. Аронзон, Е.И. Ходоров // Труды ВАМИ. – 1969. – Том. 65-66. – С. 105-112.

18. Байков, А.А. Разложение природны углекислых солей при нагревнии. / А.А. Байков, А.С. Тумарев // Известия АН СССР. – 1937. – Том. 4. – С. 562-592.

19. Беседин, П.В. Интенсификация процессов и технологии получения клинкера на основе принципов системного анализа дис... доктора тех. наук: 05.17.11 / Беседин, П.В -Белгород, 1998 -453 с.

20. Беседин, П.В. Влияние параметров процесса обжига наскорость движения материала в печи / П.В. Беседин, В.К. Классен, А.И. Литвинов и др. // Цемент. – 1978. – Том. 10. – С. 21-23.

21. Беседин, П.В.. Исследование и оптимизация процессов в технологии цементного клинкера / П.В.. Беседин, П.А.. Трубаев. – 2004. – 420 с.

22. Беседин, П.В.. Энерготехнологический анализ процессов в технологии цементного клинкера / П.В.. Беседин, П.А.. Трубаев. – 2005. – 440 с.

23. Борисов, А.Н. Принятие решений на основе нечётких моделей / А.Н. Борисов, О.А. Крумберг, И.П. Федоров. – 1990. – 420 с.

24. Варафтик, Н.Б. Справочник по теплопроводности жидкостей и газов / Н.Б. Варафтик, Л.П. Филиппов, А.А. Тарзиманов, Е.Е. Тоцкий. – Москва : Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.

25. Ващенко, Р.А. Советующая система управления цементной печью на основе нечетких диаграмм поведения ее узлов автореф. дис... канд. тех. наук: 05.13.06 / Ващенко, Р.А - Белгород., 2018 -17 с.

26. Ворошилов, А.П.. Современные проблемы сушильных механизмов / А.П.. Ворошилов. – Москва : Госэнергоиздат, 1938. – 407 с.

27. Галанин, Г.М. Регулирование температуры в начале зоны спекания вращающихся печей на Ачинском глиноземном комбинате / Г.М. Галанин, В.В. Ильющенков, И.И. Лапаев // Цветная металлургия. – 1977. – Том. 11. – С. 46-49.
28. Гришко, Б.М. Практикум по расчету горения топлива / Б.М. Гришко, П.А. Трубаев. – 2020. – 69 с.
29. Екимов, В.А.. Исследование и расчет скорости движения материала во вращающихся печах спекания глиноземного производства / В.А.. Екимов // Вращающиеся печи для спекания глиноземных (нефелиновых) шихт. – 1964. – Том. 2. – С. 21-30.
30. Екимов, В.А.. Исследование процесса образования спека при обжиге нефелино-известняковой шихты во вращающихся печах волховского алюминиевого и пикалевского глиноземного заводов / В.А.. Екимов, В.Я.. Абрамов, Э.В.. Сидорова // Вращающиеся печи для спекания глиноземных (нефелиновых) шихт. – 1964. – Том. 2. – С. 35-44.
31. Заболотны, В. Применение радиоактивных расщепов при исследованиях скорости движения материала в печи / В. Заболотны, З. Виш // Цемент. – 1975. – Том. 4. – С. 21-23.
32. Китлер, И.Н. Нефелины - комплексное сырье алюминиевой промышленности / И.Н. Китлер, Ю.А. Лайнер. – 1962. – 237 с.
33. Кичкина, Е.С.. Изучение декарбонизации процесса цементных сырьевых смесей / Е.С.. Кичкина // Труды Гипроцемента. – 1959. – Том. 21. – С. 2-29.
34. Классен, В.К.. Обжиг цементного клинкера / В.К.. Классен. – 1994. – 323 с.
35. Лайнер, А.И. Производство глинозема / А.И. Лайнер, Н.И. Ерёмин, Ю.А. Лайнер, И.З. Певзнер. – 1978. – 344 с.
36. Лапаев, И.И. Разработка и исследование системы автоматического управления процессом спекания нефелино-известняковой шихты в трубчатой вращающейся печи автореф. дис... канд. тех. наук: 05.13.07 / Лапаев, И.И. -М., 1980 -26 с.
37. Лисенко, В.Г. Топливо. Рациональное сжигание, управление и технологическое использование. Книга 2. / В.Г. Лисенко, Я.М. Щелоков, М.Г. Ладыгичев. – 2004. – 833 С.
38. Лисенко, В.Г. Вращающиеся печи: теплотехника, управление и экология. Книга 2. / В.Г. Лисенко, Я.М. Щелоков, М.Г. Ладыгичев. – 2004. – 590 с.
39. Мазель, В.А. Производство глинозема / В.А. Мазель. – 1955. – 430 с.
40. Мазуров, Д.Я. Теплотехническое оборудование заводов вяжущих материалов / Д.Я. Мазуров. – Стройиздат, 1982. – 288 с.
41. Мчедлов-Петрося, О.П. Развитие теории о реакциях в твердых фазах и минералообразование клинкера / О.П. Мчедлов-Петрося, Т.Ю. Щёткина, Н.И. Сапожникова // Цемент. – 1978. – Том. 9. – С. 8-9.
42. Нусс, М.В.. Советующая интеллектуальная система управления процессом обжига

цементного клинкера / М.В.. Нусс, П.А. Трубаев, В.К.. Классен, В.Н.. Коновалов. – 2015. – 173 с.

43. Олесова, Т.Н. Причны появления в печах с конвейрными кальцинаторами колец и борьба с ними / Т.Н. Олесова, П.В. Зозуля, М.М. Сычев и др. // Цемент. – 1977. – Том. 9. – С. 10-12.

44. 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.

45. 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.

46. Порхало, В.А Автоматизация процесса обжига клинкера на основе статистической идентификации динамических параметров вращающейся печи автореф. дис... канд. тех. наук: 05.13.06 / Порхало, В.А -Белгород., 2012 -19 с.

47. Розентретер, Р.Г. Влияние окиси железа на взаимодействие алюмосиликата нария с углекислым кальцием / Р.Г. Розентретер, Н.С. Берснева // Химия и технология глинозема /. – 1971. – С. 29-33.

48. Рывкин, В.Д. Повышение качества продуктов приометаллургических процессв при комплексной переработке щелочных алюмосиликатов в производстве глинозема дис...док. тех. наук: 05.16.03. 05.17.08/ Рывкин, В.Д. -Л., 1991 -330 с.

49. Рывкин, В.Д.. Автоматизированные системы управления технологическим процессами во вращающихся печах / В.Д.. Рывкин. – 1975. – 40 с.

50. Светлицкий, А.М Исследование, синтез и внедрение системы автоматического управления качеством спека в трубчатой вращающейся печи при производстве глинозема из нефелинов автореф. дис... канд. тех. наук: 05.13.07 / Светлицкий, А.М -М., 1979 -28 с.

51. 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.

52. 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.

53. Совершенствование техники и технологии переработки бокситовых, нефелиновых и алунитовых руд с целью снижения энергетических затрат. – 1983. – 143 с.54. Соколинская, Ч.А. Разработка метода контроля и способа восстановления обмазки в зоне спекания цементных вращающихся печей: автореф. дис... канд. тех. наук: 05.17.11 / Соколинская, Ч.А. -М., 1983 -24 с.

55. Срибнер, Н.Г. Движение материала во вращающихся барабанах / Н.Г. Срибнер // Труды ВАМИ. – 1976. – Том. 94. – С. 49-55.

56. Технологический регламент Пикалевского глиноземного завода. – 2012.

57. Троицкий, А.В. Основы металлургии. Т. 6. Средства и системы автоматического контроля и управления в цветной металлургии / А.В. Троицкий, Ю.Я. Ольский, С. И.А.. – 1973. – 679 с.

58. Трубаев, П.А. Методы компьютерного моделирования горения и теплообмена во вращающихся печах / П.А. Трубаев, В.А. Кузнецов, П.В. Беседин. – 2008. – 231 с.

59. 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.

60. 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.

61. Хазанов, Е.И. О кинетике взаимодействия нефелина с углекислым кальцием и влиянии восстановителя на этот процесс / Е.И. Хазанов, Г.А. Луданова // Известия института нефти и углехимического синтеза. – 1969. – Том. 10. – С. 75-80.

62. Хазанов, Е.И. Исследование продуктов спекания нефелина с известняком методом ИКС / Е.И. Хазанов, Л.А. Печеницына // Известия института нефти и углехимического синтеза. – 1969. – Том. 10. – С. 90-93.

63. Хазанов, Е.И. О механизме взаимодействия нефелина с известняком / Е.И. Хазанов, С.А. Стахеева, Г.В. Кузьмина // Сырьевые ресурсы легких металлов Восточной Сибири. – 1965.

– С. 3-10.

64. Ходоров, Е.И.. Движение материала во вращающихся печах / Е.И.. Ходоров. – Москва, 1957. – 64 с.

65. Ходоров, Е.И. Печи цементной промышленности / Е.И. Ходоров 1. – Ленинград : Стройиздат, 1968. – 456 с.

66. Ходоров, Е.И.. Унос материала из трубчатых вращающихся печей, оборудованных цепными завесами / Е.И.. Ходоров, Б.И.. Арлюк // Труды ВАМИ. – 1968. – Том. 64. – С. 60-64.

67. Ходоров, Е.И.. Исследование процесса пылеуноса на модели вращающейся печи / Е.И.. Ходоров, М.Е.. Вольперт, Г.А.. Тимофеев // Труды ВАМИ. – 1974. – Том. 88. – С. 72-82.

68. Ходоров, Е.И.. Анализ работы вращающихся печей волховского алюминиевого и пикалевского глиноземного заводов для спекания нефелино-известняковых шихт / Е.И.. Ходоров, В.А.. Екимов, В.Я.. Абрамов // Вращающиеся печи для спекания глиноземных (нефелиновых) шихт. – 1964. – Том. 2. – С. 94-98.

69. Ходоров, Е.И.. Моделирование процесса спекания глиноземсодержащих шихт во вращающихся печах / Е.И.. Ходоров, Н.Г.. Срибнер // Труды ВАМИ. – 1971. – Том. 77. – С. 122-131.

70. Abouzeid, A.Z.M.A. The influence of operating variables on the residence time distribution for material transport in a continuous rotary drum / A.Z.M.A. Abouzeid, T.S. Mika, K. V. Sastry, D.W. Fuerstenau // Powder Technology. – 1974. – Vol. 10. – № 6. – P. 273-288. DOI: 10.1016/0032-5910(74)85002-3.

71. Abramov, V.Y. Research of regularities of work of chain heat exchangers / V.Y. Abramov. – Leningrad, 1966. – 194 p.

72. Afacan, A. Solids hold-up in rotary drums / A. Afacan, J.H. Masliyah // Powder Technology. – 1990. – Vol. 61. – № 2. DOI: 10.1016/0032-5910(90)80153-P.

73. Alabugin, A. Combined approach to analysis and regulation of thermodynamic processes in the energy technology complex / A. Alabugin, S. Aliukov, K. Osintsev // Processes. – 2021. – Vol. 9. – № 2. DOI: 10.3390/pr9020204.

74. Bayard, R.A.. New Formula Developed for Kiln Time / R.A.. Bayard // Chem & Metall. – 1945. – Vol. 52. – P. 100-102.

75. Berta, R. Ash ring formation in lime rotary kilns Department of Thermal Engineering and Gas industry , Technical university in Department of Thermal Engineering and Gas industry , Technical university in / R. Berta, L. Lukáč. – 2018. – Vol. I. – P. 1-4.

76. Boateng, A.A. Rotary Kilns: Transport Phenomena and Transport Processes: Second Edition. Rotary Kilns: Transport Phenomena and Transport Processes: Second Edition / A.A. Boateng. – 2015.

77. Bongo Njeng, A.S. Effect of lifter shape and operating parameters on the flow of materials in a pilot rotary kiln: Part I. Experimental RTD and axial dispersion study / A.S. Bongo Njeng, S. Vitu, M. Clause et al. // *Powder Technology*. – 2015. – Vol. 269. – P. 554-565. DOI: 10.1016/j.powtec.2014.03.066.
78. Bongo Njeng, A.S. Effect of lifter shape and operating parameters on the flow of materials in a pilot rotary kiln: Part III. Up-scaling considerations and segregation analysis / A.S. Bongo Njeng, S. Vitu, M. Clause et al. // *Powder Technology*. – 2016. – Vol. 297. DOI: 10.1016/j.powtec.2016.04.052.
79. Brent, R.P. Algorithms for Minimization Without Derivatives / R.P. Brent // *IEEE Transactions on Automatic Control*. – 1974. – Vol. 19. – № 5. – P. 632-633. DOI: 10.1109/TAC.1974.1100629.
80. Chatterjee, A. Flow of materials in rotary kilns used for sponge iron manufacture: Part III. Effect of ring formation within the kiln / A. Chatterjee, P.K. Mukhopadhyay // *Metallurgical Transactions B*. – 1983. – Vol. 14. – № 3. – P. 393-399. DOI: 10.1007/BF02654358.
81. Chatterjee, A. Flow of materials in rotary kilns used for sponge iron manufacture: Part II. Effect of kiln geometry / A. Chatterjee, A. V. Sathe, P.K. Mukhopadhyay // *Metallurgical Transactions B*. – 1983. – Vol. 14. – № 3. DOI: 10.1007/BF02654357.
82. Chatterjee, A. Flow of materials in rotary kilns used for sponge iron manufacture: Part I. Effect of some operational variables / A. Chatterjee, A. V. Sathe, M.P. Srivastava, P.K. Mukhopadhyay // *Metallurgical Transactions B*. – 1983. – Vol. 14. – № 3. DOI: 10.1007/BF02654356.
83. Chen, W.Z. Residence time and mass flow rate of particles in carbon rotary kilns / W.Z. Chen, C.H. Wang, T. Liu et al. // *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. – 2009. – Vol. 48. – № 4. DOI: 10.1016/j.cep.2009.01.002.
84. Chen, H. Burning condition recognition of rotary kiln based on spatiotemporal features of flame video / H. Chen, T. Yan, X. Zhang // *Energy*. – 2020. – Vol. 211. DOI: 10.1016/j.energy.2020.118656.
85. Cho, S. Optimization of an explosive waste incinerator via an artificial neural network surrogate model / S. Cho, M. Kim, B. Lyu, I. Moon // *Chemical Engineering Journal*. – 2021. – Vol. 407. DOI: 10.1016/j.cej.2020.126659.
86. Colin, B. Wood chips flow in a rotary kiln: Experiments and modeling / B. Colin, J.L. Dirion, P. Arlabosse, S. Salvador // *Chemical Engineering Research and Design*. – 2015. – Vol. 98. DOI: 10.1016/j.cherd.2015.04.017.
87. Danish, M. Exact analytical solution for the bed depth profile of solids flowing in a rotary kiln / M. Danish, S. Kumar, S. Kumar // *Powder Technology*. – 2012. – Vol. 230. DOI: 10.1016/j.powtec.2012.06.042.

88. Fedorova, E. Review: Axial Motion of Material in Rotary Kilns/ E. Fedorova, **V. Morgunov**, K. Lobko, E. Pupysheva// Eng. – 2025. – Vol. 6, Issue 6. – p. 106. DOI: 10.3390/eng6060106.
89. 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. Pupysheva// Non-ferrous Metals. - 2024. - № 1. - PP. 28-34. DOI: 10.17580/nfm.2024.01.05.
90. Fokin, L.R. The viscosity and self-diffusion of rarefied steam: Refinement of reference data / L.R. Fokin, A.N. Kalashnikov // High Temperature. – 2008. – Vol. 46. – № 5. – P. 614-619. DOI: 10.1134/S0018151X08050040.
91. Friedman, E.. Studies in Rotary Drying / E.. Friedman, A.. Marshall // Chem. – 1949. – Vol. 45. – P. 482-588.
92. Fu, D.M. Research on Soft Measurement Method of Temperature Field in Cement Rotary Kiln / D.M. Fu, P.W. Song, X.J. Zhang, G. Liu // Chinese Control Conference, CCC. – 2020. – Vols. 2020-July. DOI: 10.23919/CCC50068.2020.9189022.
93. Furnas, C.C. The rate of calcination o limestone / C.C. Furnas // Industrial and Engineering Chemistry. – 1931. – Vol. 23. – № 5. – P. 534-538.
94. Guigui, G. Thermodynamics of a cement kiln / G. Guigui, F. Huy // Third International Congress on Cement Chemistry. – 1958. – P. 346-370.
95. Haar, L.W. NBS/NRC Steam Tables: Thermodynamic and Transport Properties and Computer Programs for Vapor and Liquid States of Water in SI Units / L.W. Haar, J.S. Gallagher, G. Kell. – Hemisphere Publishing Corporation, 1984. – 340 p.
96. Haeldermans, T. Numerical prediction of the mean residence time of solid materials in a pilot-scale rotary kiln / T. Haeldermans, M.A. Lataf, G. Vanroelen et al. // Powder Technology. – 2019. – Vol. 354. DOI: 10.1016/j.powtec.2019.06.008.
97. Hehl, M. Longitudinal mixing in horizontal rotary drum reactors / M. Hehl, H. Kröger, H. Helmrich, K. Schügerl // Powder Technology. – 1978. – Vol. 20. – № 1. – P. 29-37. DOI: 10.1016/0032-5910(78)80005-9.
98. Heiligenstaedt, W. Thermique appliquee aux fours industriels / W. Heiligenstaedt. – 2. – Paris : Dunod, 1971.
99. Henein, H. The modeling of transverse solids motion in rotary kilns / H. Henein, J.K. Brimacombe, A.P. Watkinson // Metallurgical Transactions B. – 1983. – Vol. 14. – № 2. – P. 207-220. DOI: 10.1007/BF02661017.
100. Hilsenrath, J. Tables of Thermal Properties of Gases / J. Hilsenrath, C.W. Beckett, W.S. Benedict et al. – Washington, D.C. : National Bureau of Standards (U.S. Department of Commerce), 1955. – 493 p.

101. Hu, Y. Working Condition Recognition Based on Transfer Learning and Attention Mechanism for a Rotary Kiln / Y. Hu, W. Zheng, X. Wang, B. Qin // *Entropy*. – 2022. – Vol. 24. – № 9. DOI: 10.3390/e24091186.
102. Huang, N.E. The empirical mode decomposition and the Hubert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis / N.E. Huang, Z. Shen, S.R. Long et al. // *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. – 1998. – Vol. 454. – № 1971. – P. 903-995. DOI: 10.1098/rspa.1998.0193.
103. Kichkina, E.S. Study of material movement and dust formation in rotary kilns by the labeled atom method / E.S. Kichkina, I.G. Abramson, F.I. Bednyakov et al. // *Cement*. – 1967. – Vol. 4. – P. 6-8.
104. Kramers, H. The passage of granular solids through inclined rotary kilns / H. Kramers, P. Croockewit // *Chemical Engineering Science*. – 1952. – Vol. 1. – № 6. – P. 259-265. DOI: 10.1016/0009-2509(52)87019-8.
105. Lebas, E. Experimental study of residence time, particle movement and bed depth profile in rotary kilns / E. Lebas, F. Hanrot, D. Ablitzer, J. -L Houzelot // *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. – 1995. – Vol. 73. – № 2. – P. 173-180. DOI: 10.1002/cjce.5450730202.
106. Lee, C.C. *Handbook of Environmental Engineering Calculations*, 2 nd edition / C.C. Lee, S.D. Lin. – 2007. – 1712 p.
107. Li, S.Q. Axial transport and residence time of MSW in rotary kilns: Part II. Theoretical and optimal analyses / S.Q. Li, Y. Chi, R.D. Li et al. // *Powder Technology*. – 2002. – Vol. 126. – № 3. – P. 228-240. DOI: 10.1016/S0032-5910(02)00015-3.
108. Li, T. Predicting the combustion state of rotary kilns using a Convolutional Recurrent Neural Network / T. Li, Z. Zhang, H. Chen // *Journal of Process Control*. – 2019. – Vol. 84. DOI: 10.1016/j.jprocont.2019.10.009.
109. Liu, X.Y. Mean residence time and hold-up of solids in rotary kilns / X.Y. Liu, E. Specht // *Chemical Engineering Science*. – 2006. – Vol. 61. – № 15. – P. 5176-5181. DOI: 10.1016/j.ces.2006.03.054.
110. Liu, T. A tutorial review on process identification from step or relay feedback test / T. Liu, Q. Wang, H. Huang // *Journal of Process Control*. – 2013. DOI: 10.1016/j.jprocont.2013.08.003.
111. Lu, S. Multi-control Strategy Combinatorial Control of Burning Temperature of Cement Rotary Kiln / S. Lu, H. Yu, X. Wang et al. // *2018 IEEE 4th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC)*. – IEEE, 2018. – P. 86-90.
112. Martynov, S.A. Innovative ore-thermal furnace control systems / S.A. Martynov, O.N. Masko, S.N. Fedorov // *Tsvetnye Metally*. – 2022. – Vol. 2022. – № 4. – P. 87-94. DOI: 10.17580/tsm.2022.04.11.

113. Mellmann, J. The transverse motion of solids in rotating cylinders-forms of motion and transition behavior / J. Mellmann // *Powder Technology*. – 2001. – Vol. 118. – № 3. – P. 251-270. DOI: 10.1016/S0032-5910(00)00402-2.
114. Mellmann, J. Prediction of rolling bed motion in rotating cylinders / J. Mellmann, E. Specht, X. Liu // *AIChE Journal*. – 2004. – Vol. 50. – № 11. – P. 2783-2793. DOI: 10.1002/aic.10266.
115. Murphy, N. Axial transport and residence time of MSW in rotary kilns Part I. Experimenta / N. Murphy, C. Palmer // *The Foot*. – 1993. – Vol. 3. – № 4. – P. 205-206. DOI: 10.1016/0958-2592(93)90012-R.
116. Ndiaye, L.G. Application of the dynamic model of Saeman to an industrial rotary kiln incinerator: Numerical and experimental results / L.G. Ndiaye, S. Caillat, A. Chinnayya et al. // *Waste Management*. – 2010. – Vol. 30. – № 7. DOI: 10.1016/j.wasman.2009.09.023.
117. Ngako, S. Numerical investigation of bed depth height, axial velocity and mean residence time of inert particles in steady state industrial cement rotary kiln: Case of Figuil Plant in Cameroon / S. Ngako, R. Mouangue, S. Caillat et al. // *Powder Technology*. – 2015. – Vol. 271. DOI: 10.1016/j.powtec.2014.11.007.
118. Noshirvani, G. Estimation of coating thickness in a rotary kiln by using shell temperature and kiln modeling / G. Noshirvani, M. Shirvani, J. Askari-Mamani, H. Nourzadeh // *ZKG International*. – 2013. – Vol. 66. – № 11.
119. Paredes, I.J. Measurement of the residence time distribution of a cohesive powder in a flighted rotary kiln / I.J. Paredes, B. Yohannes, H.N. Emady et al. // *Chemical Engineering Science*. – 2018. – Vol. 191. DOI: 10.1016/j.ces.2018.06.044.
120. Parveen, N. Development and analyses of data-driven models for predicting the bed depth profile of solids flowing in a rotary kiln / N. Parveen, S. Zaidi, M. Danish // *Advanced Powder Technology*. – 2020. – Vol. 31. – № 2. DOI: 10.1016/j.appt.2019.11.023.
121. Peray Kurt. *The Rotary Cement Kiln Second Edition*. Vol. 2 / Peray Kurt. – 1986.
122. Perron, J. Rotary cylinders: Solid transport prediction by dimensional and rheological analysis / J. Perron, R.T. Bui // *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. – 1990. – Vol. 68. – № 1. – P. 61-68. DOI: 10.1002/cjce.5450680108.
123. Perry, J.H. *Chemical engineers' handbook* / J.H. Perry // *Journal of Chemical Education*. – 1950. – Vol. 27. – № 9. – P. 533. DOI: 10.1021/ed027p533.1.
124. Perry, R.H.. *Chemical Engineers' Handbook* / R.H.. Perry, C.G.. Chilton, S.D.. Kirkpatrick. – 1961. – 1942 p.
125. Pham, D.S. An Efficient Feature Extraction Method for the Detection of Material Rings in Rotary Kilns / D.S. Pham, J. Ridley, M. Lazarescu // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. – 2020. – Vol. 16. – № 9. DOI: 10.1109/TII.2020.2965996.

126. Pieper, C. Numerical investigation of the impact of coating layers on RDF combustion and clinker properties in rotary cement kilns / C. Pieper, S. Wirtz, S. Schaefer, V. Scherer // *Fuel*. – 2021. – Vol. 283. – P. 1-14. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.118951.
127. Rippon, L. Visualization of multiscale ring formation in a rotary kiln / L. Rippon, B. Hirtz, C. Sheehan et al. // *Nordic Pulp and Paper Research Journal*. – 2021. – Vol. 36. – № 4. DOI: 10.1515/npprj-2021-0048.
128. Ronco, J.J. Tecnologia de las operaciones y 10s procesos de la industria quimica / J.J. Ronco // *Industria y Quimica*. – 1965. – Vol. 20. – P. 605-614.
129. Rutle, J. Investigation of material transport in wet-process rotatory kilns by radio isotopes / J. Rutle // *Pit and Quarry*. – 1955. – Vol. 48. – № 1. – P. 120-136. DOI: 10.3989/mc.1956.v06.i070.2374.
130. Saeman, W.C. Passage of solids through rotary kilns: factors affecting time passage / W.C. Saeman // *Chemical Engineering Progress*. – 1951. – Vol. 47. – P. 508.
131. Saeman, W.C. Passage of solids through rotary kilns: factors affecting time passage / W.C. Saeman // *Pit and Quarry*. – 1952. – Vol. 45. – № 4. – P. 97-104.
132. Sai, P.S.T. Residence time distribution and material flow studies in a rotary kiln / P.S.T. Sai, G.D. Surender, A.D. Damodaran et al. // *Metallurgical Transactions B*. – 1990. – Vol. 21. – № 6. – P. 1005-1011. DOI: 10.1007/BF02670271.
133. Sai, P.S.T. Prediction of axial velocity profiles and solids hold-up in a rotary kiln / P.S.T. Sai, G.D. Surender, A.D. Damodaran // *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. – 1992. – Vol. 70. – № 3. DOI: 10.1002/cjce.5450700305.
134. Scott, D.M. Flow of granular material through an inclined, rotating cylinder fitted with a dam / D.M. Scott, J.F. Davidson, S.-Y. Lim, R.J. Spurling // *Powder Technology*. – 2008. – Vol. 182. – № 3. – P. 466-473. DOI: 10.1016/j.powtec.2007.07.017.
135. Specht, E. Experimental investigation of solid bed depth at the discharge end of rotary kilns / E. Specht, Y.C. Shi, H. Woche et al. // *Powder Technology*. – 2010. – Vol. 197. – № 1-2. DOI: 10.1016/j.powtec.2009.08.024.
136. Spurling, R.J. The transient response of granular flows in an inclined rotating cylinder / R.J. Spurling, J.F. Davidson, D.M. Scott // *Chemical Engineering Research and Design*. – 2001. – Vol. 79. – № 1. DOI: 10.1205/026387601528525.
137. Sullivan, J.D.. Passage of Solid Particles Through Rotary Cylindrical Kilns / J.D.. Sullivan, C.G.. Maier, O.C.. Ralston // *Technical Papers*. – 1927. – P. 1-42.
138. Vähl, L. Transport of solids through horizontal rotary cylinders / L. Vähl, W.G. Kingma // *Chemical Engineering Science*. – 1952. – Vol. 1. – № 6. – P. 253-258. DOI: 10.1016/0009-2509(52)87018-6.

139. Wang, M. Multivariable nonlinear predictive control of a clinker sintering system at different working states by combining artificial neural network and autoregressive exogenous / M. Wang, E. Chen, P. Liu, W. Guo // *Advances in Mechanical Engineering*. – 2020. – Vol. 12. – № 1. DOI: 10.1177/1687814019896509.
140. Wu, W.N. Measurement of the local material depth in a directly-heated pilot rotary kiln based on temperature fields / W.N. Wu, X.Y. Liu, Z. Hu et al. // *Powder Technology*. – 2018. – Vol. 330. – P. 12-18. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.02.005.
141. Xiangyu, Z. Temperature measurement of coal fired flame in the cement kiln by raw image processing / Z. Xiangyu, L. Xu, Y. Yu et al. // *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*. – 2018. – Vol. 129. – P. 471-478. DOI: 10.1016/j.measurement.2018.07.063.
142. Xu, J. A Soft Sensor Modeling of Cement Rotary Kiln Temperature Field Based on Model-Driven and Data-Driven Methods / J. Xu, D. Fu, L. Shao et al. // *IEEE Sensors Journal*. – 2021. – Vol. 21. – № 24. DOI: 10.1109/JSEN.2021.3116937.
143. Yang, M.C. EMD-Based Preprocessing with a Fuzzy Inference System and a Fuzzy Neural Network to Identify Kiln Coating Collapse for Predicting Refractory Failure in the Cement Process / M.C. Yang, J.Z. Wang, T.Y. Sun // *International Journal of Fuzzy Systems*. – 2018. – Vol. 20. – № 8. DOI: 10.1007/s40815-018-0510-7.
144. Zablony, W.W.. The Movement of the Charge in Rotary Kilns / W.W.. Zablony // *International Chemical Engineering*. – 1965. – Vol. 5. – P. 360-366.
145. Zadeh, L.A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning-I / L.A. Zadeh // *Information Sciences*. – 1975. – Vol. 8. – № 3. – P. 199-249. DOI: 10.1016/0020-0255(75)90036-5.
146. Zanolli, S.M. Advanced Process Control for Clinker Rotary Kiln and Grate Cooler / S.M. Zanolli, C. Pepe, G. Astolfi // *Sensors*. – 2023. – Vol. 23. – № 5. DOI: 10.3390/s23052805.
147. Zanolli, S.M. Control and optimization of a cement rotary kiln: A model predictive control approach / S.M. Zanolli, C. Pepe, M. Rocchi // *2016 Indian Control Conference, ICC 2016 - Proceedings*. – 2016.
148. Zhang, X. Multivariate Time-Series Modeling for Forecasting Sintering Temperature in Rotary Kilns Using DCGNet / X. Zhang, Y. Lei, H. Chen et al. // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. – 2021. – Vol. 17. – № 7. DOI: 10.1109/TII.2020.3022019.
149. Zhang, R. Recognition method of cement rotary kiln burning state based on Otsu-Kmeans flame image segmentation and SVM / R. Zhang, S. Lu, H. Yu, X. Wang // *Optik*. – 2021. – Vol. 243. DOI: 10.1016/j.ijleo.2021.167418.
150. Zhang, Z. A simple step-change method to determine mean residence time in rotary kiln

and a predictive model at low inclination / Z. Zhang, Y. Wu, H. Li et al. // Powder Technology. – 2018. – Vol. 333. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.04.002.

151. Zheng, J. Hybrid model of a cement rotary kiln using an improved attention-based recurrent neural network / J. Zheng, L. Zhao, W. Du // ISA Transactions. – 2022. DOI: 10.1016/j.isatra.2022.02.018.

152. Zhongda, T. SVM predictive control for calcination zone temperature in lime rotary kiln with improved PSO algorithm / T. Zhongda, L. Shujiang, W. Yanhong, W. Xiangdong // Transactions of the Institute of Measurement and Control. – 2018. – Vol. 40. – № 10. – P. 3134-3146. DOI: 10.1177/0142331217716983.

153. Zhu, H.B. Soft sensor model based on improved elman neural network with variable data preprocessing and its application / H.B. Zhu, Y. Zhang // Journal of Sensors. – 2018. – Vol. 2018. DOI: 10.1155/2018/2981428.

154. Wirtz, S. Impact of coating layers in rotary cement kilns: Numerical investigation with a blocked-off region approach for radiation and momentum / S. Wirtz, C. Pieper, F. Buss et al. // Thermal Science and Engineering Progress. – 2020. – Vol. 15. DOI: 10.1016/j.tsep.2019.100429.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Анализ экспериментов, представленных в литературе по теме моделирования осевого движения материала

В таблицах (2-4) в столбике «особые условия» указываются следующие обозначения, кратко характеризующие особенности конкретного эксперимента:

DH – В эксперименте оценивалось влияние заглушек, перегородок, барьеров

ЛОП – В эксперименте оценивалось влияние лопаток

CL – В эксперименте оценивалось влияние геометрии, имитирующей образование обмазки или колец

R – В эксперименте оценивалось влияние ребер

REAL – Эксперимент проводился при реальных условиях

Chains – В цилиндре использовалась цепная завеса

Таблица А.1 - Обзорная таблица экспериментов из литературы по определению высоты слоя материала (составлено автором)

№	Материал	Размер частиц (мм)	Плотность частица (кг/м ³)	Насыпная плотность (кг/м ³)	Статический угол откоса	Динамический угол откоса	Длина, м	Диаметр м	Скорость вращения грп	Угол наклона печи degree	Степень заполнения	Расход	Особые условия
[137]	Песок	0.5	-	-	-	34.96	2.13	0.152	2.5	2	25	0.0144 (м ³ /ч)	-
[129]	Цементная шихта	-	-	-	-	-	79.25	2.5	0.91	2.29	-	7.95 м ³ /ч	REAL Chains
[129]	Цементная шихта	-	-	-	-	-	99.06	2.5	0.91	2.29	-	7.95 м ³ /ч	REAL Chains
[129]	Цементная шихта	-	-	-	-	-	109.73	3.4	1	2.29	-	14.56 м ³ /ч	REAL Chains
[129]	Цементная шихта	-	-	-	-	-	112.78	3.4	0.86	2.29	-	16.58 м ³ /ч	REAL Chains
[64]	Клинкер	3.5-5	-	1550	37	46.1	2.7	0.5-0.3	1.05-3.47	1-4.5	5-10	-	
[64]	Клинкер	2-3.5	-	1518	38.4	47.5	2.7	0.5-0.3	1.05-3.47	1-4.5	5-10	-	
[64]	Клинкер	0.6-2	-	1570	38.2	47.5	2.7	0.5-0.3	1.05-3.47	1-4.5	5-10	-	
[64]	Красный кирпич	3.5-5	-	915	42.0	53.2	2.7	0.5-0.3	1.05-3.47	1-4.5	5-10	-	
[64]	Красный кирпич	2-3.5	-	915	39.4	52	2.7	0.5-0.3	1.05-3.47	1-4.5	5-10	-	
[64]	Красный кирпич	0.6-2	-	945	39.3	51.4	2.7	0.5-0.3	1.05-3.47	1-4.5	5-10	-	

Продолжение таблицы А.1

№	Материал	Размер частиц (мм)	Плотность частица (кг/м ³)	Насыпная плотность (кг/м ³)	Статический угол откоса	Динамический угол откоса	Длина, м	Диаметр м	Скорость вращения грм	Угол наклона печи degree	Степень заполнения	Расход	Особые условия
[64]	Известняк	3.5-5	-	1340	39.4	44.5	2.7	0.5-0.3	1.05-3.47	1-4.5	5-10	-	
[64]	Известняк	2-3.5	-	1245	40	47.35	2.7	0.5-0.3	1.05-3.47	1-4.5	5-10	-	
[64]	Известняк	0.6-2	-	1230	40	48.5	2.7	0.5-0.3	1.05-3.47	1-4.5	5-10	-	
[64]	Мергель	0.2-2	-	1265	45	50	2.7	0.5-0.3	1.05-3.47	1-4.5	5-10	-	
[64]	Сиштоф	0.2-2	-	777	40	44.3	2.7	0.5-0.3	1.05-3.47	1-4.5	5-10	-	
[64]	Песок	0.2-2	-	2650	33.25	37.4	2.7	0.5-0.3	1.05-3.47	1-4.5	5-10	-	
[64]	Цементная шихта	-	-	1155	43.18	49.48	45	2.7	1.07	2.18	-	6.19 т/час	REAL
[103]	Цементная шихта	-	-	-	-	-	150	3	-	-	-	-	REAL Chains
[82]	Железная руда	3-6	-	-	-	-	2	0.3	0.3-0.7	1-3	-	30 кг/ч	-
[82]	Железная руда	3-6	-	-	-	-	2	0.3	0.3-0.7	1-3	-	30 кг/ч	
[81]	Железная руда	-	-	1600	35	-	2	0.2-0.6	0.6	1.5	-	0.25 – 1.25 кг/ч	-
[81]	Железная руда	-	-	1600	35	-	2-4.8	0.3	0.6	1.5	-	0.25 – 1.25 кг/ч	-
[81]	Железная руда	-	-	1600	35	-	2	0.2-0.6	0.6	1.5	-	0.25 – 1.25 кг/ч	DH
[81]	Железная руда	-	-	1600	35	-	2-4.8	0.3	0.6	1.5	-	0.25 – 1.25 кг/ч	DH
[80]	Железная руда	3-6	-	-	-	-	2	0.3	0.3-0.7	1.5	-	0.5 кг/ч	CL
[80]	Железная руда	3-6	-	-	-	-	4.8	0.3	0.3-0.7	1.5	-	0.5 кг/ч	CL
[132]	Ильменит	0.1-0.3	4200	-	27.4	-	5.9	0.147	1-3	0.78-1.37	-	6.8 - 36 кг/ч	DH

Продолжение таблицы А.1

№	Материал	Размер частиц (мм)	Плотность частица (кг/м ³)	Насыпная плотность (кг/м ³)	Статический угол откоса	Динамический угол откоса	Длина, м	Диаметр м	Скорость вращения грм	Угол наклона печи degree	Степень заполнения	Расход	Особые условия
[105]	Уголь	5-20	1240	750	47	37	6	0.6	2-4	1	8-23	0.424-0.835 (м3/ч)	-
[105]	Кокс	5-20	720	480	47	37	6	0.6	2-4	1	8-23	0.424-0.835 (м3/ч)	-
[136]	Песок	0.49	-	1600	32	-	1	0.119	3-7.5	0-5	5-25	-	-
[136]	Песок	0.49	-	1600	32	-	1	0.0515	3-7.5	0-5	5-25	-	-
[134]	Песок	0.46	-	1600	32	-	1	0.0515	5.6-7.5	0-5	2-25	-	ДН
[134]	Песок	0.46	-	1600	32	-	1	0.053	5.6-7.5	0-5	2-25	-	ДН
[116]	Гранулир. бетон	0.40	-	1360	32	-	16	4.096	0.267-0.89	1-2.2	3.67-12.24	-	-
[116]	Гранулир. бетон	0.40	-	1360	32	-	16	4.096	0.267-0.89	1-2.2	3.67-12.24	-	ДН
[135]	Кварцевый песок	0.1-0.4	-	1570	-	32	5	0.4	1-8	1-5	-	45 – 440 кг/ч	ДН
[135]	Клинкер	1-12	-	1410	-	31	5	0.4	1-8	1-5	-	45 – 440 кг/ч	ДН
[135]	Стеклянные шарики	0.4-0.84	-	1560	-	21	5	0.4	1-8	1-5	-	45 – 440 кг/ч	ДН
[135]	Кварцевый песок	0.1-0.4	-	1570	-	32	6.7	0.25	3.5	1-2	-	25-90 кг/ч	-
[135]	Клинкер	1-12	-	1410	-	31	6.7	0.25	3.5	1-2	-	25-90 кг/ч	-
[135]	Стеклянные шарики	0.4-0.84	-	1560	-	28	6.7	0.25	3.5	1-2	-	25-90 кг/ч	-
[117]	Цементная шихта	-	948	-	35	-	55	2.3	0-3.57	1.72	-	0-24 тонн./ч	REAL
[86]	Сырая щепа	5-15х 2-7х 1-3	-	280	-	42	4.2	0.21	2-4	1-2	5.2-18.1	4-8 кг/ч	-

Таблица А.2 - Обзорная таблица экспериментов из литературы по определению осевой скорости движения материала (составлено автором)

№	Материал	Размер частиц (мм)	Плотность частица (кг/м ³)	Насыпная плотность (кг/м ³)	Статический угол откоса	Динамический угол откоса	Длина, м	Диаметр м	Скорость вращения грм	Угол наклона печи degree	Степень заполнения	Расход	Особые условия
[137]	Песок	0.5	-	-	-	34.95	2.13	0.152	2.5	2	25	0.0144 (м ³ /ч)	-
[138]	Песок	0.2-1	-	1490	33	-	0.65	0.11	10-50	0	20-40	-	-
[138]	Рожь	7x2	-	710	40	-	0.65	0.11	10-50	0	20-40	-	-
[129]	Цементная шихта	-	-	-	-	-	79.25	2.5	0.91	2.29	-	7.95 м ³ /ч	REAL Chains
[129]	Цементная шихта	-	-	-	-	-	99.06	2.5	0.91	2.29	-	7.95 м ³ /ч	REAL Chains
[129]	Цементная шихта	-	-	-	-	-	109.73	3.4	1	2.29	-	14.56 м ³ /ч	REAL Chains
[129]	Цементная шихта	-	-	-	-	-	112.78	3.4	0.86	2.29	-	16.58 м ³ /ч	REAL Chains
[64]	Клинкер	3.5-5	-	1550	37	46.1	2.7	0.5-0.3	1.05-3.47	1-4.5	5-10	-	
[64]	Клинкер	2-3.5	-	1518	38.4	47.5	2.7	0.5-0.3	1.05-3.47	1-4.5	5-10	-	
[64]	Клинкер	0.6-2	-	1570	38.2	47.5	2.7	0.5-0.3	1.05-3.47	1-4.5	5-10	-	
[64]	Красный кирпич	3.5-5	-	915	42.0	53.2	2.7	0.5-0.3	1.05-3.47	1-4.5	5-10	-	
[64]	Красный кирпич	2-3.5	-	915	39.4	52	2.7	0.5-0.3	1.05-3.47	1-4.5	5-10	-	
[64]	Красный кирпич	0.6-2	-	945	39.3	51.4	2.7	0.5-0.3	1.05-3.47	1-4.5	5-10	-	
[64]	Известняк	3.5-5	-	1340	39.4	44.5	2.7	0.5-0.3	1.05-3.47	1-4.5	5-10	-	
[64]	Известняк	2-3.5	-	1245	40	47.35	2.7	0.5-0.3	1.05-3.47	1-4.5	5-10	-	
[64]	Известняк	0.6-2	-	1230	40	48.5	2.7	0.5-0.3	1.05-3.47	1-4.5	5-10	-	
[64]	Мергель	0.2-2	-	1265	45	50	2.7	0.5-0.3	1.05-3.47	1-4.5	5-10	-	
[64]	Сиштоф	0.2-2	-	777	40	44.3	2.7	0.5-0.3	1.05-3.47	1-4.5	5-10	-	
[64]	Песок	0.2-2	-	2650	33.25	37.4	2.7	0.5-0.3	1.05-3.47	1-4.5	5-10	-	

Продолжение таблицы А.2

[83]	Кокс	3.5	-	755	34	-	3	0.45	1-8	1.74-3.76	-	-	DH
[83]	Кокс	3.5	-	755	34	-	3	0.554	1-8	1.74-3.76	-	-	DH
[116]	Гранулир. бетон	0.40	-	1360	32	-	16	4.096	0.267- 0.89	1-2.2	3.67- 12.24	-	-
[117]	Цементная шихта	-	948	-	35	-	55	2.3	0-3.57	1.72	-	0-24 тонн/ч	REAL
[71]	Нефелин + Известняк	0.5-10	-	-	-	-	23 из 150	3.4	1.8	1°43'	-	44м3/ч	REAL Chains
[64]	Цементная шихта	-	-	1155	43.18	49.48	45	2.7	1.07	2.18	-	6.19 т/час	REAL
[103]	Цементная шихта	-	-	-	-	-	150	3	-	-	-	-	REAL Chains
[103]	Цементная шихта	-	-	-	-	-	150	4	-	-	-	-	REAL Chains
[31]	Цементная шихта	-	-	-	-	-	150	4	1.07	4	-	40.5 т/час	REAL
[31]	Цементная шихта	-	-	-	-	-	150	4	1.07	4	-	40.5 т/час	REAL R
[31]	Цементная шихта	-	-	-	-	-	50	3.2	0.79-1.17	5	-	-	REAL
[31]	Цементная шихта	-	-	-	-	-	50.4	3.1	0.8	3.5	-	-	REAL
[31]	Цементная шихта	-	-	-	-	-	85.5	2.9	-	3.5	-	-	REAL
[31]	Цементная шихта	-	-	-	-	-	85.5	2.9	-	3.5	-	-	REAL R
[115]	Песок	1-2	2660	1342	29.7	-	1.8	0.3	0.5-10	0-5	-	-	DH R
[115]	Щепки Бумага Резина	-	777.6	225	48.5	-	1.8	0.3	0.5-10	0-5	-	-	DH R
[105]	Кокс	5-20	720	480	47	37	6	0.6	2-4	1	8-23	0.424- 0.835 (м3/ч)	-

Продолжение таблицы А.2

№	Материал	Размер частиц (мм)	Плотность частица (кг/м ³)	Насыпная плотность (кг/м ³)	Статический угол откоса	Динамический угол откоса	Длина, м	Диаметр м	Скорость вращения грм	Угол наклона печи degree	Степень заполнения	Расход	Особые условия
[136]	Песок	0.49	-	1600	32	-	1	0.0515	3-7.5	0-5	5-25	-	-
[136]	Песок	0.49	-	1600	32	-	1	0.119	3-7.5	0-5	5-25	-	-
[21]	Цементная шихта	-	-	-	-	-	185	5	0.93	-	-	-	REAL Chains
[21]	Цементная шихта	-	-	-	-	-	185	5	0.918	-	-	-	REAL Chains
[21]	Цементная шихта	-	-	-	-	-	185	5	1.2	-	-	-	REAL Chains

Таблица А.3 - Обзорная таблица экспериментов из литературы по определению среднего времени пребывания (составлено автором)

№	Материал	Размер частиц	Плотность частица (кг/м ³)	Насыпная плотность (кг/м ³)	Статический угол откоса	Динамический угол откоса	Длина м	Диаметр м	Скорость вращения грм	Угол наклона печи degree	Степень заполнения	Расход	Особые условия
[137]	Песок	0.5	-	-	-	34.95	2.13	0.152	2.5	2	25	0.0144 (м3/ч)	-
[138]	Песок	0.2-1	-	1490	33	-	0.65	0.11	10-50	0	20-40	-	-
[138]	Рожь	7x2	-	710	40	-	0.65	0.11	10-50	0	20-40	-	-
[129]	Цементная шихта	-	-	-	-	-	79.25	2.5	0.91	2.29	-	7.95 м3/ч	REAL Chains
[129]	Цементная шихта	-	-	-	-	-	99.06	2.5	0.91	2.29	-	7.95 м3/ч	REAL Chains
[129]	Цементная шихта	-	-	-	-	-	109.73	3.4	1	2.29	-	14.56 м3/ч	REAL Chains
[129]	Цементная шихта	-	-	-	-	-	112.78	3.4	0.86	2.29	-	16.58 м3/ч	REAL Chains
[64]	Клинкер	3.5-5	-	1550	37	46.1	2.7	0.5-0.3	1.05-3.47	1-4.5	5-10	-	-

Продолжение таблицы А.3

№	Материал	Размер частиц (мм)	Плотность частица (кг/м ³)	Насыпная плотность (кг/м ³)	Статический угол откоса	Динамический угол откоса	Длина, м	Диаметр м	Скорость вращения грм	Угол наклона печи degree	Степень заполнения	Расход	Особые условия
[64]	Клинкер	2-3.5	-	1518	38.4	47.5	2.7	0.5-0.3	1.05-3.47	1-4.5	5-10	-	
[64]	Клинкер	0.6-2	-	1570	38.2	47.5	2.7	0.5-0.3	1.05-3.47	1-4.5	5-10	-	
[64]	Красный кирпич	3.5-5	-	915	42.0	53.2	2.7	0.5-0.3	1.05-3.47	1-4.5	5-10	-	
[64]	Красный кирпич	2-3.5	-	915	39.4	52	2.7	0.5-0.3	1.05-3.47	1-4.5	5-10	-	
[64]	Красный кирпич	0.6-2	-	945	39.3	51.4	2.7	0.5-0.3	1.05-3.47	1-4.5	5-10	-	
[64]	Известняк	3.5-5	-	1340	39.4	44.5	2.7	0.5-0.3	1.05-3.47	1-4.5	5-10	-	
[64]	Известняк	2-3.5	-	1245	40	47.35	2.7	0.5-0.3	1.05-3.47	1-4.5	5-10	-	
[64]	Известняк	0.6-2	-	1230	40	48.5	2.7	0.5-0.3	1.05-3.47	1-4.5	5-10	-	
[64]	Мергель	0.2-2	-	1265	45	50	2.7	0.5-0.3	1.05-3.47	1-4.5	5-10	-	
[64]	Сиштоф	0.2-2	-	777	40	44.3	2.7	0.5-0.3	1.05-3.47	1-4.5	5-10	-	
[64]	Песок	0.2-2	-	2650	33.25	37.4	2.7	0.5-0.3	1.05-3.47	1-4.5	5-10	-	
[64]	Цементная шихта	-	-	1155	43.18	49.48	45	2.7	1.07	2.18	-	6.19 т/час	REAL
[103]	Цементная шихта	-	-	-	-	-	150	3	-	-	-	-	REAL Chains
[103]	Цементная шихта	-	-	-	-	-	150	4	-	-	-	-	REAL Chains
[70]	Доломит	28x35, 35x48, 48x65 – СТ*	-	-	-	-	0.24	0.08	20-80	0-3	-	1.8 кг/ч – 8.64 кг/ч	-
[31]	Цементная шихта	-	-	-	-	-	150	4	1.07	4	-	40.5 т/час	REAL
[31]	Цементная шихта	-	-	-	-	-	150	4	1.07	4	-	40.5 т/час	REAL R
[31]	Цементная шихта	-	-	-	-	-	50	3.2	0.79-1.17	5	-	-	REAL

Продолжение таблицы А.3

№	Материал	Размер частиц	Плотность частица (кг/м3)	Насыпная плотность (кг/м3)	Статический угол откоса	Динамический угол откоса	Длина м	Диаметр м	Скорость вращения грм	Угол наклона печи degree	Степень заполнения	Расход	Особ. условия
[31]	Цементная шихта	-	-	-	-	-	50.4	3.1	0.8	3.5	-	-	REAL
[31]	Цементная шихта	-	-	-	-	-	85.5	2.9	-	3.5	-	-	REAL
[31]	Цементная шихта	-	-	-	-	-	85.5	2.9	-	3.5	-	-	REAL R
[97]	Карбонат натрия	0.137	2530	-	-	-	0.6	0.25	1-10	0	16-40	0.0025 – 0.0102 м3/ч	-
[82]	Железная руда	3-6	-	-	-	-	2	0.3	0.3-0.7	1-3	-	30 кг/ч	-
[81]	Железная руда	-	-	1600	35	-	2	0.2-0.6	0.6	1.5	-	0.25 – 1.25 кг/ч	-
[81]	Железная руда	-	-	1600	35	-	2-4.8	0.3	0.6	1.5	-	0.25 – 1.25 кг/ч	-
[82]	Железная руда	3-6	-	-	-	-	2	0.3	0.3-0.7	1-3	-	30 кг/ч	DN
[81]	Железная руда	-	-	1600	35	-	2	0.2-0.6	0.6	1.5	-	0.25 – 1.25 кг/ч	DN
[81]	Железная руда	-	-	1600	35	-	2-4.8	0.3	0.6	1.5	-	0.25 – 1.25 кг/ч	DN
[80]	Железная руда	3-6	-	-	-	-	2	0.3	0.3-0.7	1.5	-	0.5 кг/х	CL
[80]	Железная руда	3-6	-	-	-	-	4.8	0.3	0.3-0.7	1.5	-	0.5 кг/х	CL
[132]	Ильменит	0.1-0.3	4200	-	27.4	-	5.9	0.147	1-3	0.78-1.37	-	-	DN
[132]	Ильменит	0.1-0.3	4200	-	27.4	-	5.9	0.147	1-3	0.78-1.37	-	-	-
[72]	Песок	2.02	2630	1640	36	-	1.05	0.192	0-100	0	-	22.68 – 109.08 Кг/ч	DN ЛОП

Продолжение таблицы А.3

№	Материал	Размер частиц	Плотность частица (кг/м3)	Насыпная плотность (кг/м3)	Статический угол откоса	Динамический угол откоса	Длина м	Диаметр м	Скорость вращения грм	Угол наклона печи degree	Степень заполнения	Расход	Особые условия
[115]	Песок	1-2	2660	1342	29.7	-	1.8	0.3	0.5-10	0-5	-	-	DH R
[115]	Щепки Бумага Резина		777.6	225	48.5	-	1.8	0.3	0.5-10	0-5	-	-	DH R
[105]	Уголь	5-20	1240	750	47	37	6	0.6	2-4	1	8-23	0.424- 0.835 (м3/ч)	-
[105]	Кокс	5-20	720	480	47	37	6	0.6	2-4	1	8-23	0.424- 0.835 (м3/ч)	-
[109]	Песок	0.366	-	1370	-	33	4.635	0.4	1-3	3	2-11	59.9 – 149.536 кг/ч	DH
[83]	Кокс	3.5	-	755	34	-	3	0.45	1-8	1.74-3.76	-	-	DH
[83]	Кокс	3.5	-	755	34	-	3	0.554	1-8	1.74-3.76	-	-	DH
[116]	Гранулир. бетон	0.40	-	1360	32	-	16	4.096	0.267- 0.89	1-2.2	3.67- 12.24	-	-
[86]	Сырая щепа	5-15x 2-7x 1-3	-	280	-	42	4.2	0.21	2-4	1-2	5.2-18.1	4-8 кг/ч	-
[86]	Сырая щепа	5-15x 2-7x 1-3	-	280	-	42	4.2	0.21	2-4	1-2	5.2-18.1	4-8 кг/ч	-
[77]	Песок	0.55	-	1422	39	-	1.95	0.101	2-12	2-5	-	0.68 – 2.5 кг/ч	DH ЛОП
[77]	Рис	3.8x1.9	-	889	36	-	1.95	0.101	2-12	2-5	-	0.68 – 2.5 кг/ч	DH ЛОП
[117]	Цементная шихта	-	948	-	35	-	55	2.3	0-3.57	1.72	-	0-24 тонн./ч	REAL
[119]	Щепки	5-17x 2-8x 1-4	1506	260	42	-	4.2	0.21	0.5-21	1-3	8-10	2.5-7.5 кг/ч	R ЛОП

Продолжение таблицы А.3

№	Материал	Размер частиц	Плотность частица (кг/м ³)	Насыпная плотность (кг/м ³)	Статический угол откоса	Динамический угол откоса	Длина м	Диаметр м	Скорость вращения грм	Угол наклона печи degree	Степень заполнения	Расход	Особ. условия
[150]	Кварцевый песок	3 – 3.75	2650	-	-	-	1.2	0.1	1-3	0.5-3	15	18-36 кг/ч	-
[96]	Уголь	0.053 – 0.579	-	530	-	29.2	1	0.095	1.5 – 10	1.1-2	2.8-13	0.2 – 2.3 кг/ч	-
[96]	Оливковые косточки	1.144 – 3.624	-	790	-	38.0	1	0.095	1.5 – 10	1.1-2	2.8-13	0.2 – 2.3 кг/ч	-
[96]	Песок	0.257 – 0.416	-	1470	-	34.0	1	0.095	1.5 – 10	1.1-2	2.8-13	0.2 – 2.3 кг/ч	-
[48]	Гидроксид алюминия	-	-	-	-	-	51	2.56	1.98	1.43	2.1	2640 м ³ /с	REAL
[48]	Гидроксид алюминия	-	-	-	-	-	51	2.56	1.98	1.43	2	2640 м ³ /с	REAL
[48]	Гидроксид алюминия	-	-	-	-	-	60	2.84	1.98	1.43	2.4	3140 м ³ /с	REAL
[48]	Гидроксид алюминия	-	-	-	-	-	50	2.24	1.04	1.43	2.1	1830 м ³ /с	REAL
[48]	Гидроксид алюминия	-	-	-	-	-	50	2.42	1.35	1.43	1.5	1970 м ³ /с	REAL
[48]	Гидроксид алюминия	-	-	-	-	-	50	2.05	1.182	1.43	1.7	1750 м ³ /с	REAL
[48]	Гидроксид алюминия	-	-	-	-	-	60	2.84	1.8	1.15	2	3060 м ³ /с	REAL
[48]	Гидроксид алюминия	-	-	-	-	-	60	2.84	1.98	1.72	1.8	3400 м ³ /с	REAL
[48]	Гидроксид алюминия	-	-	-	-	-	60	2.584	1.8	1.72	1.8	3350 м ³ /с	REAL

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Справочные данные для комплексной модели

В данном приложении представлены все используемые в работе справочные значения в необходимых значениях с указанием первоисточников.

Таблица Б.1 - Средняя удельная объемная теплоемкость, кДж/(м³К), при постоянном давлении газов и воздуха в интервале температур от 0 до t, °С [28]

t, °С	CO ₂	N ₂	O ₂	H ₂ O	Воздух	SO ₂
0	1.603	1.295	1.306	1.494	1.297	1.735
100	1.704	1.296	1.317	1.505	1.3	1.815
200	1.791	1.299	1.335	1.521	1.307	1.889
300	1.867	1.308	1.356	1.541	1.316	1.956
400	1.934	1.316	1.377	1.564	1.328	2.019
500	1.993	1.328	1.398	1.588	1.341	2.07
600	2.046	1.34	1.417	1.614	1.355	2.116
700	2.094	1.354	1.434	1.639	1.369	2.153
800	2.136	1.367	1.45	1.666	1.383	2.182
900	2.175	1.379	1.465	1.693	1.396	2.216
1000	2.209	1.392	1.478	1.721	1.408	2.237
1100	2.241	1.403	1.489	1.748	1.42	2.202
1200	2.269	1.414	1.501	1.774	1.431	2.279
1300	2.296	1.425	1.511	1.8	1.443	2.3
1400	2.32	1.435	1.521	1.826	1.453	2.321
1500	2.342	1.444	1.53	1.851	1.462	2.343
1600	2.356	1.453	1.538	1.876	1.471	2.363
1700	2.374	1.461	1.546	1.89	1.479	2.384
1800	2.392	1.469	1.554	1.921	1.487	-
1900	2.407	1.476	1.562	1.942	1.494	-
2000	2.422	1.483	1.569	1.963	1.501	-
2100	2.436	1.496	1.576	1.982	1.507	-
2200	2.448	1.502	1.583	2.001	1.514	-

Продолжение таблицы Б.1

t, °C	CO ₂	N ₂	O ₂	H ₂ O	Воздух	SO ₂
2300	2.46	1.507	1.59	2.019	1.519	-
2400	2.471	1.513	1.596	2.037	1.525	-

Таблица Б.2 - Теплопроводность, Вт/(м·К), при атмосферном давлении в интервале температур от 0 до t, °C [24]

O ₂		N ₂		CO ₂		H ₂ O	
t, °C	λ, Вт/(м·К)	t, °C	λ, Вт/(м·К)	t, °C	λ, Вт/(м·К)	t, °C	λ, Вт/(м·К)
6.85	0.0238	26.85	0.0261	6.85	0.01509	100	0.0245
26.85	0.0251	126.85	0.033	16.85	0.01584	110	0.0252
46.85	0.0264	176.85	0.0358	26.85	0.0166	120	0.026
66.85	0.0278	226.85	0.0385	36.85	0.01737	130	0.0269
86.85	0.0291	326.85	0.0448	46.85	0.01814	140	0.0277
106.85	0.0304	426.85	0.0506	56.85	0.0189	150	0.0286
126.85	0.0317	526.85	0.0562	66.85	0.01967	160	0.0295
146.85	0.033	626.85	0.0614	76.85	0.02044	170	0.0304
166.85	0.0343	726.85	0.066	86.85	0.02119	180	0.0313
186.85	0.0356	926.85	0.0764	96.85	0.02197	190	0.0322
206.85	0.0369	1226.85	0.0931	106.85	0.02273	200	0.0331
226.85	0.0381	1726.85	0.1151	116.85	0.0235	210	0.0341
326.85	0.0459	-	-	126.85	0.02432	220	0.0351
426.85	0.0536	-	-	146.85	0.02526	230	0.0361
526.85	0.0608	-	-	166.85	0.02623	240	0.0371
626.85	0.0673	-	-	186.85	0.02723	250	0.0381
726.85	0.073	-	-	206.85	0.02826	260	0.0391
926.85	0.0836	-	-	226.85	0.03063	270	0.0401
1226.85	0.104	-	-	276.85	0.03306	280	0.0412
-	-	-	-	326.85	0.03557	290	0.0423
-	-	-	-	376.85	0.03817	300	0.0433
-	-	-	-	426.85	0.04087	310	0.0444
-	-	-	-	476.85	0.05089	320	0.0455

Продолжение таблицы Б.2

O ₂		N ₂		CO ₂		H ₂ O	
-	-	-	-	526.85	0.05449	330	0.0467
-	-	-	-	576.85	0.05796	340	0.0478
-	-	-	-	626.85	0.06137	350	0.049
-	-	-	-	726.85	0.06804	360	0.0501
-	-	-	-	826.85	0.07466	370	0.0513
-	-	-	-	926.85	0.08057	380	0.0525
-	-	-	-	1026.85	0.08604	390	0.0536
-	-	-	-	1126.85	0.09148	400	0.0548
-	-	-	-	1226.85	0.09743	410	0.056
-	-	-	-	1326.85	0.103	420	0.0573
-	-	-	-	1426.85	0.1072	430	0.0585
-	-	-	-	1526.85	0.1117	440	0.0597
-	-	-	-	1626.85	0.1172	450	0.061
-	-	-	-	1726.85	0.1219	460	0.0622
-	-	-	-	-	-	470	0.0635
-	-	-	-	-	-	480	0.0648
-	-	-	-	-	-	490	0.066
-	-	-	-	-	-	500	0.0673
-	-	-	-	-	-	520	0.0699
-	-	-	-	-	-	540	0.0725
-	-	-	-	-	-	560	0.0752
-	-	-	-	-	-	580	0.0778
-	-	-	-	-	-	600	0.0805
-	-	-	-	-	-	620	0.0832
-	-	-	-	-	-	640	0.0859
-	-	-	-	-	-	660	0.0887
-	-	-	-	-	-	680	0.0914

Продолжение таблицы Б.2

O ₂		N ₂		CO ₂		H ₂ O	
-	-	-	-	-	-	700	0.0942
-	-	-	-	-	-	1127	0.187
-	-	-	-	-	-	1327	0.219

Таблица Б.3 - Плотность, кг/м³, при атмосферном давлении в интервале температур от 0 до t, °C [95; 100]

H ₂ O				O ₂		N ₂		CO ₂	
t, °C	ρ, кг/м ³	t, °C	ρ, кг/м ³	t, °C	ρ, кг/м ³	t, °C	ρ, кг/м ³	t, °C	ρ, кг/м ³
0	999.84	260	0.4083	6.85	1.567642	6.85	1.202567	6.85	1.927575
5	999.97	270	0.40068	16.85	1.538047	16.85	1.158051	16.85	1.859764
10	999.7	280	0.39324	26.85	1.300719	26.85	1.138281	26.85	1.796302
15	999.1	290	0.38575	36.85	1.25862	36.85	1.084887	36.85	1.737783
20	998.21	300	0.37895	46.85	1.218594	46.85	1.056801	46.85	1.682822
25	997.05	320	0.36596	56.85	1.18074	56.85	1.028841	56.85	1.631025
30	995.65	340	0.35311	66.85	1.144943	66.85	1.002319	66.85	1.582589
35	994.03	360	0.34138	76.85	1.111148	76.85	0.976372	76.85	1.53692
40	992.22	380	0.33072	86.85	1.079295	86.85	0.951387	86.85	1.493821
45	990.21	400	0.3223	96.85	1.049286	96.85	0.927291	96.85	1.453095
50	988.04	420	0.31405	106.85	1.021106	106.85	0.90402	106.85	1.414544
55	985.69	440	0.30601	116.85	0.99467	116.85	0.881512	116.85	1.377969
60	983.2	450	0.29802	126.85	0.969934	126.85	0.859754	126.85	1.343174
65	980.55	460	0.29929	136.85	0.946784	136.85	0.838734	136.85	1.310356
70	977.76	480	0.29281	146.85	0.925149	146.85	0.818401	146.85	1.280305
75	974.84	500	0.28646	156.85	0.904971	156.85	0.798731	156.85	1.248871
80	971.79	520	0.28037	166.85	0.886166	166.85	0.779687	166.85	1.220402
85	968.61	540	0.26663	176.85	0.868661	176.85	0.761318	176.85	1.19312
90	965.31	560	0.26021	186.85	0.852384	186.85	0.743561	186.85	1.167023
95	961.89	580	0.25416	196.85	0.837265	196.85	0.726405	196.85	1.142113
100	0.58967	600	0.24827	206.85	0.823275	206.85	0.709836	206.85	1.118191
105	0.58127	620	0.2427	216.85	0.810343	216.85	0.69383	216.85	1.095456

Продолжение таблицы Б.3

H ₂ O				O ₂		N ₂		CO ₂	
t, °C	ρ, кг/м ³	t, °C	ρ, кг/м ³	t, °C	ρ, кг/м ³	t, °C	ρ, кг/м ³	t, °C	ρ, кг/м ³
110	0.57315	640	0.23738	226.85	0.798397	226.85	0.678375	226.85	1.073313
115	0.56529	660	0.23228	276.85	0.708955	236.85	0.663432	236.85	1.052357
120	0.55767	680	0.22736	326.85	0.660784	246.85	0.648976	246.85	1.031994
125	0.55028	700	0.22272	376.85	0.616928	256.85	0.635021	256.85	1.012422
130	0.54311	720	0.21829	426.85	0.556938	266.85	0.621529	266.85	0.99364
135	0.53614	740	0.21397	476.85	0.487318	276.85	0.608499	276.85	0.977231
140	0.52937	760	0.20977	526.85	0.457509	286.85	0.595894	286.85	0.958054
145	0.52277	780	0.20578	576.85	0.433173	296.85	0.583602	296.85	0.94125
150	0.51636	800	0.20194	626.85	0.41038	306.85	0.571648	306.85	0.925038
155	0.51011	820	0.19825	676.85	0.38986	316.85	0.560031	316.85	0.908432
160	0.50401	840	0.19468	726.85	0.371297	326.85	0.548689	326.85	0.893999
165	0.49808	860	0.1912	826.85	0.340702	336.85	0.537623	336.85	0.87937
170	0.49229	880	0.18792	926.85	0.314066	346.85	0.526869	346.85	0.865135
175	0.48664	900	0.18478	1026.85	0.290258	356.85	0.516327	356.85	0.850901
180	0.48112	920	0.18166	1126.85	0.268752	366.85	0.506099	366.85	0.83805
185	0.47574	940	0.17862	1226.85	0.249018	376.85	0.496108	376.85	0.8252
190	0.47048	960	0.17572	1326.85	0.230826	386.85	0.486416	386.85	0.812547
195	0.46534	980	0.17291	1426.85	0.21435	396.85	0.477038	396.85	0.799894
200	0.46031	1000	0.1702	1526.85	0.199331	406.85	0.467885	406.85	0.787439
210	0.45049	1200	0.13773	1626.85	0.185541	416.85	0.459044	416.85	0.775182
220	0.44129	1400	0.12956	1726.85	0.172809	426.85	0.487542	426.85	0.766226
230	0.43259	1600	0.1222	1826.85	0.160977	436.85	0.480664	436.85	0.755412
240	0.42423	1800	0.11567	1926.85	0.149959	446.85	0.474875	446.85	0.744914
250	0.41615	2000	0.10995	2026.85	0.139628	456.85	0.467509	456.85	0.734693
-	-	-	-	2126.85	0.12991	466.85	0.461182	466.85	0.724748
-	-	-	-	2226.85	0.120708	476.85	0.452291	476.85	0.715081
-	-	-	-	2326.85	0.111962	486.85	0.445714	486.85	0.70567
-	-	-	-	2426.85	0.103645	496.85	0.440537	496.85	0.696497

Продолжение таблицы Б.3

H ₂ O				O ₂		N ₂		CO ₂	
t, °C	ρ, кг/м ³	t, °C	ρ, кг/м ³	t, °C	ρ, кг/м ³	t, °C	ρ, кг/м ³	t, °C	ρ, кг/м ³
-	-	-	-	2526.85	0.095743	506.85	0.434885	506.85	0.687561
-	-	-	-	2626.85	0.088212	516.85	0.42937	516.85	0.678842
-	-	-	-	2726.85	0.081024	526.85	0.424006	526.85	0.670361
-	-	-	-	-	-	576.85	0.389043	576.85	0.615242
-	-	-	-	-	-	626.85	0.379039	626.85	0.596659
-	-	-	-	-	-	676.85	0.359332	676.85	0.563643
-	-	-	-	-	-	726.85	0.341251	726.85	0.536222
-	-	-	-	-	-	826.85	0.311527	826.85	0.510679
-	-	-	-	-	-	926.85	0.285543	926.85	0.487469
-	-	-	-	-	-	1026.85	0.262309	1026.85	0.466671
-	-	-	-	-	-	1126.85	0.241301	1126.85	0.44696
-	-	-	-	-	-	1226.85	0.222719	1226.85	0.431006
-	-	-	-	-	-	1326.85	0.207039	-	-
-	-	-	-	-	-	1426.85	0.193221	-	-
-	-	-	-	-	-	1526.85	0.180879	-	-
-	-	-	-	-	-	1626.85	0.169675	-	-
-	-	-	-	-	-	1726.85	0.159421	-	-
-	-	-	-	-	-	1826.85	0.14998	-	-
-	-	-	-	-	-	1926.85	0.141239	-	-
-	-	-	-	-	-	1976.85	0.151718	-	-
-	-	-	-	-	-	2026.85	0.144128	-	-
-	-	-	-	-	-	2126.85	0.137088	-	-
-	-	-	-	-	-	2226.85	0.130448	-	-
-	-	-	-	-	-	2326.85	0.124121	-	-
-	-	-	-	-	-	2426.85	0.118068	-	-
-	-	-	-	-	-	2526.85	0.112254	-	-
-	-	-	-	-	-	2626.85	0.106652	-	-
-	-	-	-	-	-	2726.85	0.101337	-	-

Таблица Б.4 - Вязкость, Па·с·10⁻⁵, при атмосферном давлении в интервале температур от 0 до t, °С [100]

H2O		O2		N2		CO2			
t, °С	μ	t, °С	μ	t, °С	μ	t, °С	μ	t, °С	μ
26.85	0.971	6.85	1.96142	26.85	1.78552	6.85	1.396132	736.85	3.917116
76.85	1.152	16.85	2.01707	76.85	2.00165	16.85	1.449566	746.85	3.943148
126.85	1.341	26.85	2.07081	126.85	2.20115	26.85	1.494779	756.85	3.96918
176.85	1.537	36.85	2.12071	176.85	2.38901	36.85	1.541363	766.85	3.993842
226.85	1.737	46.85	2.17253	226.85	2.56523	46.85	1.587946	776.85	4.019873
326.85	2.147	56.85	2.22243	276.85	2.72982	56.85	1.633159	786.85	4.045905
426.85	2.559	66.85	2.27041	326.85	2.88776	66.85	1.677002	796.85	4.070567
526.85	2.97	76.85	2.31647	376.85	3.03738	76.85	1.720846	806.85	4.097969
626.85	3.375	86.85	2.36253	426.85	3.1787	86.85	1.763319	816.85	4.124001
726.85	3.772	96.85	2.40859	476.85	3.31336	96.85	1.805792	826.85	4.150033
826.85	4.161	106.85	2.45273	526.85	3.4447	106.85	1.848265	836.85	4.176065
926.85	4.542	116.85	2.49496	576.85	3.56938	116.85	1.890738	846.85	4.202097
1026.85	4.913	126.85	2.53526	626.85	3.69075	126.85	1.931841	856.85	4.226759
1126.85	5.276	136.85	2.57364	676.85	3.80712	136.85	1.972944	866.85	4.254161
1226.85	5.631	146.85	2.61203	726.85	3.92183	146.85	2.014047	876.85	4.280192
1326.85	5.977	156.85	2.69071	776.85	4.033225	156.85	2.05378	886.85	4.306224
1426.85	6.317	166.85	2.73486	826.85	4.14128	166.85	2.093513	896.85	4.332256
1526.85	6.648	176.85	2.77900	876.85	4.24768	176.85	2.133246	906.85	4.358288
1626.85	6.973	186.85	2.82122	926.85	4.35076	186.85	2.171609	916.85	4.38295
1726.85	7.292	196.85	2.86152	976.85	4.45217	196.85	2.209971	926.85	4.408982
-	-	206.85	2.90375	1026.8	4.55026	206.85	2.248334	936.85	4.433644
-	-	216.85	2.94981	1076.8	4.64668	216.85	2.286697	946.85	4.458305
-	-	226.85	2.99203	1126.8	4.74145	226.85	2.32506	956.85	4.482967
-	-	326.85	3.39314	1176.8	4.83455	236.85	2.362052	966.85	4.506259
-	-	426.85	3.77698	1226.8	4.92598	246.85	2.397675	976.85	4.529551
-	-	526.85	4.12052	-	-	256.85	2.431928	986.85	4.554212
-	-	626.85	4.448706	-	-	266.85	2.47166	996.85	4.578874
-	-	726.85	4.73658	-	-	276.85	2.507283	1006.85	4.602166

Продолжение таблицы Б.4

H2O		O2		N2		CO2			
t, °C	μ	t, °C	μ	t, °C	μ	t, °C	μ	t, °C	μ
-	-	826.85	5.00335	-	-	286.85	2.541536	1016.85	4.626828
-	-	926.85	5.24901	-	-	296.85	2.578528	1026.85	4.650119
-	-	1026.85	5.47547	-	-	306.85	2.614151	1036.85	4.674781
-	-	1126.85	5.68275	-	-	316.85	2.648403	1046.85	4.699443
-	-	1226.85	5.86699	-	-	326.85	2.682656	1056.85	4.722735
-	-	1326.85	6.23164	-	-	336.85	2.716908	1066.85	4.747397
-	-	1426.85	6.73447	-	-	346.85	2.749791	1076.85	4.772058
-	-	1526.85	7.17780	-	-	356.85	2.784043	1086.85	4.79535
-	-	1626.85	7.42538	-	-	366.85	2.816926	1096.85	4.820012
-	-	1726.85	7.47912	-	-	376.85	2.849808	1106.85	4.843304
-	-	-	-	-	-	386.85	2.884061	1116.85	4.867965
-	-	-	-	-	-	396.85	2.916943	1126.85	4.891257
-	-	-	-	-	-	406.85	2.949825	1136.85	4.914549
-	-	-	-	-	-	416.85	2.981338	1146.85	4.939211
-	-	-	-	-	-	426.85	3.01285	1156.85	4.961132
-	-	-	-	-	-	446.85	3.075875	1166.85	4.984424
-	-	-	-	-	-	466.85	3.138899	1176.85	5.006345
-	-	-	-	-	-	486.85	3.200554	1186.85	5.029637
-	-	-	-	-	-	496.85	3.230696	1196.85	5.052929
-	-	-	-	-	-	506.85	3.260838	1206.85	5.07485
-	-	-	-	-	-	516.85	3.29235	1216.85	5.098142
-	-	-	-	-	-	526.85	3.322493	1226.85	5.120064
-	-	-	-	-	-	536.85	3.351265	1236.85	5.143355
-	-	-	-	-	-	546.85	3.381407	1246.85	5.166647
-	-	-	-	-	-	556.85	3.411549	1256.85	5.188569
-	-	-	-	-	-	566.85	3.440321	1266.85	5.21186
-	-	-	-	-	-	576.85	3.469093	1276.85	5.233782
-	-	-	-	-	-	586.85	3.499235	1286.85	5.257074

Продолжение таблицы Б.4

H2O		O2		N2		CO2			
t, °C	μ	t, °C	μ	t, °C	μ	t, °C	μ	t, °C	μ
-	-	-	-	-	-	596.85	3.528008	1296.85	5.280365
-	-	-	-	-	-	606.85	3.55678	1306.85	5.302287
-	-	-	-	-	-	616.85	3.585552	1316.85	5.325579
-	-	-	-	-	-	626.85	3.612954	1326.85	5.34887
-	-	-	-	-	-	636.85	3.641726	1336.85	5.369422
-	-	-	-	-	-	646.85	3.669128	1346.85	5.391344
-	-	-	-	-	-	656.85	3.6979	1356.85	5.413265
-	-	-	-	-	-	666.85	3.725302	1366.85	5.436557
-	-	-	-	-	-	676.85	3.754074	1376.85	5.457108
-	-	-	-	-	-	686.85	3.781476	1386.85	5.498211
-	-	-	-	-	-	696.85	3.808878	1396.85	5.529724
-	-	-	-	-	-	706.85	3.83765	1406.85	5.570827
-	-	-	-	-	-	716.85	3.863682	1416.85	5.598229
-	-	-	-	-	-	726.85	3.891084	1426.85	5.625631

Таблица Б.5 - Степень диссоциации H₂O [28]

t, °C	Парциальное давление H ₂ O, кПа																
	8	9	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40	45	50	60	70	80
1600	0.65	0.63	0.6	0.58	0.56	0.54	0.52	0.5	0.48	0.46	0.44	0.42	0.4	0.38	0.35	0.32	0.3
1700	1.16	1.12	1.08	1.02	0.95	0.9	0.85	0.8	0.76	0.73	0.7	0.67	0.64	0.62	0.6	0.57	0.54
1800	1.9	1.85	1.8	1.7	1.6	1.53	1.46	1.4	1.3	1.25	1.2	1.15	1.1	1.05	1	0.95	0.9
1900	3.25	3.1	3	2.85	2.7	2.6	2.5	2.4	2.2	2.1	2	1.9	1.8	1.7	1.63	1.56	1.5
2000	4.6	4.45	4.3	4	3.8	3.55	3.5	3.4	3.15	2.95	2.8	2.65	2.57	2.5	2.4	2.3	2.2
2100	6.8	6.55	6.35	6	5.7	5.45	5.25	5.1	4.8	4.55	4.3	4.1	3.9	3.7	3.55	3.4	3.25
2200	9.9	9.6	9.3	8.8	8.35	7.95	7.65	7.4	6.9	6.5	6.25	5.9	5.65	5.4	5.1	4.9	4.7
2300	13.7	13.3	12.9	12.2	11.6	11.1	10.7	10.4	9.6	9.1	8.7	8.4	8	7.7	7.3	6.9	6.7
2400	18.4	17.7	17.2	16.3	15.6	15	14.4	13.9	13	12.2	11.4	11.2	10.8	10.4	9.9	9.4	9
2500	23.5	22.7	22.1	20.9	20	19.3	18.6	18	16.8	15.9	15.2	14.6	14.1	13.7	12.9	12.3	11.7
2600	31	30.1	29.2	27.8	26.7	25.7	24.8	24.1	22.6	21.5	20.5	19.7	19.1	18.5	17.5	16.7	16
2700	37.9	36.9	35.9	34.2	33	31.8	30.8	29.9	28.2	26.8	25.7	24.8	24	23.3	22.1	21.1	20.3
2800	47.3	46.1	45	43.2	41.6	40.4	39.3	38.3	36.2	34.6	33.3	32.2	31.1	30.2	28.8	27.6	26.6
2900	55.5	54.3	53.2	51.3	49.7	48.3	47.1	46	43.7	41.9	40.5	39.2	38.1	37.1	35.4	34.1	32.9
3000	63.8	62.6	61.6	59.6	58	56.6	55.4	54.3	51.9	50	48.4	47	45.8	44.7	42.9	41.4	40.1

Таблица Б.6 - Степень диссоциации CO₂ [28]

t, °C	Парциальное давление CO ₂ , кПа																
	8	9	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40	45	50	60	70	80
500	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
1600	1.6	1.55	1.5	1.45	1.4	1.35	1.3	1.3	1.2	1.1	1	0.95	0.9	0.85	0.83	0.79	0.75
1700	3	2.9	2.8	2.6	2.5	2.4	2.3	2.2	2	1.9	1.8	1.75	1.7	1.65	1.6	1.5	1.4
1800	5	4.8	4.6	4.4	4.2	4	3.8	3.7	3.5	3.3	3.1	3	2.9	2.75	2.6	2.5	2.4
1900	8.1	7.8	7.6	7.2	6.8	6.5	6.3	6.1	5.6	5.3	5.1	4.9	4.7	4.5	4.3	4.1	3.9
2000	13.4	12.9	12.5	11.8	11.2	10.8	10.4	10	9.4	8.8	8.4	8	7.7	7.4	7.1	6.8	6.5
2100	19.6	18.9	18.3	17.3	16.6	15.9	15.3	14.9	13.9	13.1	12.5	12	11.5	11.2	10.5	10.1	9.7
2200	29.2	28.3	27.5	26.1	25	24.1	23.3	22.6	21.2	20.1	19.2	18.5	17.9	17.3	16.4	15.6	15
2300	37.9	36.9	35.9	34.3	32.9	31.8	30.9	30	28.2	26.9	25.7	24.8	24	23.2	22.1	21	20.3
2400	48.8	47.6	46.5	44.6	43.1	41.8	40.6	39.6	37.5	35.8	34.5	33.3	32.3	31.4	29.9	28.7	27.7
2500	59.3	58	56.9	55	53.4	52	50.7	49.7	47.3	45.4	43.9	42.6	41.4	40.4	38.7	37.2	36
2600	68.9	67.8	66.7	64.9	63.4	62	60.8	59.7	57.4	55.5	53.8	52.4	51.2	50.1	48.2	46.6	45.3
2700	77.6	76.6	75.7	74.1	72.8	71.6	70.5	69.4	67.3	65.5	63.9	62.6	61.3	60.3	58.4	56.8	55.4
2800	84.4	83.7	83	81	80.6	79.6	78.7	77.7	74.5	73.2	71.9	70.8	69.9	69.8	68.1	66.6	65.3
2900	89.4	88.8	88.3	87.4	86.5	85.8	85.1	84.5	83	81.8	80.7	79.7	78.8	78	76.5	75.2	74
3000	93.1	92.7	92.3	91.7	91.1	90.6	90.1	89.6	88.5	87.6	86.8	86	85.4	84.7	83.6	82.5	81.7

Таблица Б.7 - Теплоемкость материалов, ккал/кг°С [13]

t, °С	$Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$	$Na_2O \cdot Al_2O_3$	Спек	$CaCO_3$
100	0.18	-	-	-
200	0.2	0.220	0.203	0.213
300	0.21	-	-	-
400	0.22	0.247	0.213	0.226
500	0.223	0.26	-	-
600	0.225	0.271	0.23	0.233
700	0.228	0.280	-	-
800	0.23	0.295	0.24	0.24
900	0.233	0.305	-	-
1000	0.24	0.312	0.253	0.246
1100	0.25	0.315	-	-
1200	0.258	0.325	0.26	0.206
1300	0.27	0.333	-	-

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Акт о внедрении результатов диссертации

АО «МЦД»

121205, г. Москва, тер. инновационного центра Сколково, Большой б-р, д. 42, стр. 1

Тел.: +7 (495) 644-06-08

ИНН 7720666171, КПП 773101001, ОГРН 1097746511334

ОКПО 62743131



МЦД
 моделирование и
 цифровые двойники

 Санкт-Петербургский горный университет
 императрицы Екатерины II

 Акт о внедрении результатов
 кандидатской диссертации Моргунова Владимира Викторовича
 в АО «Моделирование и цифровые двойники»


№ 18151 от 01 апреля 2026 г.


Данным актом подтверждаем, что результаты диссертации на тему «Система управления процессом спекания шихты в трубчатых вращающихся печах на основе прогнозной модели и экспертной базы правил», а именно математическая модель параметров осевого движения материала в процессе спекания в трубчатых вращающихся печах, учитывающая изменение формы рабочего пространства печи в результате образования колец и обмазки, зарекомендовала себя как удобный инструмент в расчетах, применяемых в практике АО «Моделирование и цифровые двойники». Получаемые параметры профиль высоты слоя материала и среднее время пребывания материала в печи могут быть использованы как критерии оптимизации при варьировании технологических параметров процесса (скорость вращения печи, расход шихты, гранулометрический состав шихты и др.) и предпочтительных конструкторских решений: используемой футеровки, цепной зоны и подпорного кольца. По результатам опробования методика, учитывающая изменение формы рабочего пространства печи, позволила повысить точность расчёта распределения материала по длине печи на 14%.


Описанная методика была разработана Моргуновым В.В. в рамках подготовки его диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

С учетом положительных результатов опробования, данная методика рекомендована к внедрению и систематическому использованию в исследовательской работе АО «Моделирование и цифровые двойники».

 Директор филиала в СЗФО – Директор по развитию бизнеса в ЦН  Феоктистов А.Ю.

 Руководитель проектно-исследовательского центра сыпучих материалов ЦН  Читалов Л.С.

 Руководитель проектной группы  Юсупов Г.А.

 Руководитель проектов  Тугушев Р.Ш.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г
Патенты на изобретения



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**НА ИЗОБРЕТЕНИЕ
№ 2849725

**УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ДИНАМИЧЕСКОГО УГЛА ЕСТЕСТВЕННОГО
ОТКОСА СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА И ТОЛЩИНЫ
АКТИВНОГО СЛОЯ В РЕЖИМЕ КАЧЕНИЯ**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II" (RU)*

Авторы: *Федорова Эльмира Рафаэлевна (RU), Моргунов Владимир Викторович (RU)*

Заявка № 2025116627

Приоритет изобретения **17 июня 2025 г.**

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации **28 октября 2025 г.**

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает **17 июня 2045 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Ю.С. Зубов



ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Свидетельства на программу для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024662736

Программа для расчета параметров поперечного движения материала в трубчатой вращающейся печи

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II» (RU)*

Авторы: *Федорова Эльмира Рафаэльевна (RU), Морзунов Владимир Викторович (RU)*

Заявка № 2024660560

Дата поступления 14 мая 2024 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 30 мая 2024 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Ю.С. Зубов'.

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**СВИДЕТЕЛЬСТВО**

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024662839**Программа для расчета параметров осевого движения
материала в трубчатой вращающейся печи**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II» (RU)*

Авторы: *Федорова Эльмира Рафаэлевна (RU), Моргунов
Владимир Викторович (RU)*

Заявка № **2024661429**Дата поступления **14 мая 2024 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **30 мая 2024 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Перечень ситуаций в аварийном режиме работы системы

Таблица Е.1 - Аварийные ситуации (по данным автора)

Название	Признак	Действия оператора
Образование красного пятна на корпусе печи	Резкое локальное повышение температуры корпуса печи по данным сканера оболочки; превышение температуры корпуса в контролируемой зоне выше 450 °С; высокая скорость роста температуры корпуса в отдельном участке печи.	При небольшом красном пятне в верхней переходной зоне или центральной части зоны горения необходимо продолжить работу печи под усиленным контролем, включить вентиляторы охлаждения корпуса в зоне перегрева, скорректировать форму и длину факела с учетом расположения пятна, обеспечить стабильный тепловой режим печи и не допускать дальнейшего роста зоны перегрева. При расположении пятна в верхней переходной зоне факел следует укоротить для подвода менее прогретого материала к зоне перегрева и восстановления гарнисажа. При близком расположении пятна к горячему концу факел следует сделать более вытянутым и менее концентрированным, чтобы снизить локальную тепловую нагрузку. При необходимости следует скорректировать состав шихты для улучшения условий образования защитного покрытия. При большом красном пятне, его быстром увеличении, расположении под кольцом или в зоне, где гарнисаж обычно не формируется, печь необходимо немедленно остановить для предотвращения деформации и повреждения корпуса. Запрещается охлаждать красное пятно водой.
Поступление необоженного сырья в холодильник	Быстрый рост температуры решеток холодильника; рост температуры спека на выходе из печи или в холодильнике; снижение эффективности продувки материала в холодильнике; рост давления в камере холодильника или под решетками; резкое изменение нагрузки главного привода печи.	При первых признаках поступления необоженного материала необходимо не допускать его дальнейшего продвижения в холодильник. Следует снизить скорость вращения печи до минимально допустимой или перевести печь на вспомогательный привод. Одновременно необходимо уменьшить подачу сырья и скорректировать подачу топлива с учетом состояния зоны горения, не допуская затухания факела и неполного сгорания. При признаках ослабления обжига, сопровождающихся снижением нагрузки главного привода, появлением СО и снижением NOx, печь переводят на тихий ход, снижают питание и выдерживают режим прогрева до восстановления устойчивого теплового состояния. Если холодильник уже заполнен необоженным мелкодисперсным материалом, необходимо остановить подачу сырья, перевести печь на вспомогательный привод и продолжать контролируемый дожиг материала при подаче топлива. Для защиты холодильника следует уменьшить скорость движения решеток, при необходимости перейти на ручное управление приводом решеток и увеличить время пребывания материала в зоне охлаждения.

Продолжение таблицы Е.1

Название	Признак	Действия оператора
Поступление необожженного сырья в холодильник		Воздушный режим холодильника необходимо регулировать так, чтобы обеспечить максимально возможное охлаждение материала без недопустимого роста давления в камере холодильника. При угрозе повреждения решеток, закупорке холодильника или невозможности восстановить продувку требуется останов печи по аварийной процедуре.
Падение обмазки	Резкое изменение температурного профиля корпуса печи по данным термосканера на локальном участке; внезапное изменение нагрузки или тока главного привода печи; падение разрежения в задней части печи; снижение содержания O ₂ в отходящих газах; рост СО в отходящих газах при ухудшении горения; смещение давления в колпаке печи в сторону положительных значений; рост давления под решетками холодильника при поступлении большого количества мелкодисперсного материала.	При фиксации признаков падения обмазки необходимо быстро стабилизировать тепловой режим зоны спекания и не допустить поступления большого количества необожженного материала в холодильник. Следует резко увеличить тягу для сохранения устойчивого газового режима и предотвращения роста давления в колпаке. Подачу топлива необходимо увеличить для компенсации падения температуры в зоне спекания, при этом обеспечить устойчивое горение топлива и контролировать содержание СО в отходящих газах. При росте СО подачу топлива следует ограничить, но тягу не снижать. Факел необходимо сделать более коротким и интенсивным, чтобы повысить тепловую нагрузку в зоне спекания. Подачу сырья следует скорректировать в сторону снижения с учетом степени нарушения режима. При наличии частотного регулирования допускается плавно снизить скорость вращения печи на 10–15 %; при ступенчатом регулировании скорости резкое снижение не рекомендуется из-за риска дополнительной механической нагрузки на корпус. Холодильник необходимо перевести в режим повышенной продувки: увеличить расход воздуха, скорректировать уставки давления и обеспечить интенсивное охлаждение поступающего материала. При росте давления под решетками выше допустимого предела, закупорке холодильника или невозможности восстановить продувку необходимо остановить печь по аварийной процедуре.
Опасный перегрев в зоне горения	Повышение температуры в зоне горения выше допустимого уровня; рост температуры спека на выходе из печи или в холодильнике; повышение давления под решеткой холодильника; рост температуры решеток холодильника; изменение нагрузки главного привода печи, связанное с образованием крупных агломератов или затруднением схода материала; возможное появление локального перегрева корпуса печи по данным термосканера.	При возникновении признаков опасного перегрева необходимо снизить подачу топлива до минимально допустимого уровня, чтобы уменьшить тепловую нагрузку в зоне горения. Одновременно следует увеличить разрежение за счет дымососа для проветривания зоны спекания и отвода избыточного тепла. Подачу первичного воздуха необходимо уменьшить, чтобы снизить интенсивность и локальную концентрацию факела. При наличии признаков образования крупных агломератов допускается временно увеличить скорость вращения печи для их разрушения и продвижения материала, однако изменение скорости должно выполняться с учетом возможностей привода и механического состояния агрегата. Воздушный режим холодильника следует перевести на максимально возможное охлаждение без перехода давления в колпаке в положительную область.

Продолжение таблицы Е.1

Название	Признак	Действия оператора
Опасный перегрев в зоне горения	Повышение температуры в зоне горения выше допустимого уровня; рост температуры спека на выходе из печи или в холодильнике; повышение давления под решеткой холодильника; рост температуры решеток холодильника; изменение нагрузки главного привода печи, связанное с образованием крупных агломератов или затруднением схода материала; возможное появление локального перегрева корпуса печи по данным термосканера.	Необходимо проверить соответствие фактической подачи сырья заданному значению и при необходимости скорректировать питание, поскольку перегрев может быть связан со снижением фактической загрузки или поступлением более легкоплавкой шихты. При повторяющемся перегреве следует инициировать корректировку состава сырья в сторону более труднообжигаемой смеси. После снижения температуры и разрушения агломератов параметры печи постепенно возвращают к нормальному режиму: восстанавливают подачу топлива, скорость печи и режим дымососа. При образовании крупного «козла» в холодильнике или невозможности нормального схода материала требуется переход к процедурам его разрушения либо останов печи по аварийной схеме.
Резкое повышение температуры отходящих газов	Быстрый рост температуры отходящих газов на выходе из печи или перед пылеулавливающим оборудованием; снижение фактической подачи сырья ниже допустимого уровня или резкая остановка питания; рост температуры в задней части печи; возможное повышение содержания СО в отходящих газах; снижение O ₂ в отходящих газах при неполном сгорании; слишком высокая скорость дымососа; слишком низкая скорость вращения печи.	При резком повышении температуры отходящих газов необходимо в первую очередь защитить пылеулавливающее оборудование и заднюю часть печи от термического повреждения. Следует немедленно отключить электрофильтр или перевести его в безопасное состояние согласно регламенту. Подачу топлива необходимо резко снизить или остановить в соответствии с допустимой аварийной процедурой предприятия, чтобы прекратить дальнейший рост температуры отходящих газов. Одновременно следует снизить производительность дымососа, чтобы уменьшить вынос высокотемпературных газов в сторону фильтра и оборудования газохода. Необходимо проверить наличие и фактическое значение подачи сырья; при возможности восстановить подачу сырья и увеличить питание до безопасного уровня, обеспечивающего охлаждение задней части печи. При сохранении подачи топлива следует контролировать содержание СО и O ₂ в отходящих газах, не допуская накопления горючих компонентов. Персонал необходимо предупредить о запрете нахождения вблизи заднего конца печи и газоходов. Запрещается открывать люки и двери на заднем конце печи до стабилизации температуры и состава отходящих газов. После снижения температуры отходящих газов параметры печи постепенно возвращают к нормальному режиму, а заднюю часть печи, газоходы и пылеулавливающее оборудование проверяют на наличие тепловых повреждений.

Продолжение таблицы Е.1

Название	Признак	Действия оператора
Выброс черного дыма	Резкий рост содержания СО или других горючих компонентов в отходящих газах; снижение содержания О ₂ в отходящих газах ниже допустимого уровня; падение температуры в зоне горения или признаков устойчивого горения; снижение разрежения в печи; несоответствие между подачей топлива и расходом воздуха, выражающееся в избытке топлива при недостаточной тяге.	При появлении признаков выброса черного дыма необходимо немедленно отключить электрофильтр или перевести его в безопасное состояние согласно регламенту. Подачу топлива следует резко снизить до минимального безопасного уровня или остановить по аварийной процедуре предприятия, не допуская дальнейшего накопления горючих компонентов в газовом тракте. Необходимо прекратить любые действия, которые могут привести к резкому поступлению воздуха в систему и создать взрывоопасную смесь. Дымосос и воздушный режим следует изменять только в соответствии с аварийным регламентом; резкое увеличение тяги при наличии сажи и горючих газов не допускается. Печь необходимо перевести в безопасное состояние, остановить развитие процесса горения и обеспечить контролируемое проветривание газового тракта после снижения температуры и стабилизации состава отходящих газов. Персонал должен быть предупрежден о запрете нахождения вблизи заднего конца печи, газоходов и пылеулавливающего оборудования. Запрещается открывать люки и двери на заднем конце печи до окончания проветривания и подтверждения безопасного состава газовой среды. Возврат к нормальному режиму допускается только после снижения температуры, отсутствия СО и других горючих компонентов в отходящих газах, восстановления содержания О ₂ до безопасного уровня и проверки состояния газоходов и пылеулавливающего оборудования.
Потеря участка футеровки	Быстрый локальный рост температуры корпуса печи по данным термосканера; появление четко очерченной протяженной зоны перегрева корпуса; превышение допустимой температуры корпуса на локальном участке; высокая скорость роста температуры корпуса в зоне повреждения футеровки.	При выявлении признаков потери участка футеровки необходимо немедленно остановить печь по аварийной процедуре. Продолжение работы не допускается, так как отсутствие футеровки приводит к прямому тепловому воздействию на корпус печи, его деформации и риску дальнейшего разрушения футеровки. После останова необходимо обеспечить безопасное охлаждение агрегата, провести осмотр зоны повреждения и выполнить ремонт или замену футеровки перед повторным пуском печи.
Остановка привода холодильника или конвейера спека	Остановка привода холодильника или конвейера спека по сигналу состояния оборудования; резкий рост тока привода холодильника перед остановкой; срабатывание защиты по перегрузке привода холодильника или конвейера; повышение давления под решеткой холодильника; рост температуры материала в холодильнике; рост температуры решеток холодильника; признаки перегрузки холодильника по уровню или массе материала при наличии соответствующего контроля.	При остановке привода холодильника или конвейера спека необходимо немедленно остановить подачу сырья и перевести печь в безопасный режим. Скорость вращения печи следует снизить до минимально допустимой или остановить печь в соответствии с аварийной процедурой предприятия, чтобы не допустить дальнейшей перегрузки холодильника.

Продолжение таблицы Е.1

Название	Признак	Действия оператора
Остановка привода холодильника или конвейера спека		Необходимо попытаться перезапустить привод холодильника или конвейер спека только при отсутствии признаков механического заклинивания и после проверки условий безопасного пуска. Если привод не удастся восстановить в течение регламентированного времени или сохраняются признаки перегрузки, печь необходимо полностью остановить. После останова следует периодически проворачивать печь в соответствии с регламентом, не допуская чрезмерного поступления материала в холодильник. До повторного пуска необходимо устранить причину остановки: проверить состояние решеток, приводов, пересыпных узлов и наличие крупных кусков материала или обмазки в холодильнике.
Поступление раскаленного спека в холодильник	Рост температуры спека на входе в холодильник; повышение температуры решеток холодильника; рост температуры воздуха после холодильника; повышение давления под решетками холодильника; локальное ухудшение охлаждения материала по зонам холодильника при наличии соответствующего контроля; рост токовой нагрузки приводов решеток при накоплении горячего материала.	При поступлении раскаленного спека в холодильник необходимо перевести управление холодильником в режим усиленного охлаждения. Для колосникового холодильника следует уменьшить скорость первой и второй решеток, чтобы увеличить время пребывания материала в зоне интенсивного охлаждения. Уставку давления под решетками необходимо повысить в пределах допустимого диапазона, например с 50 до 60 мбар, если это предусмотрено регламентом и не приводит к недопустимому росту давления в колпаке. Расход охлаждающего воздуха следует увеличить с учетом ограничений по давлению и устойчивости газового режима печи. Если холодильник имеет подвижный пол и перегретый материал движется преимущественно по одной стороне, необходимо локально уменьшить скорость соответствующей зоны вплоть до полной остановки этой секции, чтобы задержать горячий спек и обеспечить его охлаждение. При сохранении высокой температуры спека, росте температуры решеток или риске повреждения холодильника необходимо снизить тепловую нагрузку печи и перейти к аварийной процедуре остановки.