

О Т З Ы В

официального оппонента доктора технических наук, профессора Уткина Льва Владимировича на диссертацию Моргунова Владимира Викторовича на тему: «Система управления процессом спекания шихты в трубчатых вращающихся печах на основе прогнозной модели и экспертной базы правил», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

1. Актуальность темы диссертации

Актуальность темы диссертационной работы определяется значением процесса спекания нефелинового концентрата с известняком для производства глинозема в условиях ограниченности качественной бокситовой минерально-сырьевой базы. Для отечественной алюминиевой промышленности вовлечение в переработку высококремнистого нефелинового сырья имеет существенное значение, однако эффективность такой переработки во многом зависит от эффективности управления наиболее энергоемкой стадии – спекания в трубчатых вращающихся печах.

Трубчатые вращающиеся печи, которые используются для спекания, с точки зрения автоматизации являются сложным объектом, так как характеризуются многосвязными распределенными параметрами, высокой инерционностью и сложностью протекающих процессов в агрегате. Данные свойства объекта, а также наличие большого количества неконтролируемых возмущений, таких как теплотворная способность топлива и влажность шихтового материала, в значительной степени усложняют эффективное управление процессом. При этом подавляющее большинство систем управления трубчатыми вращающимися печами на сегодняшний день представлено локальными системами автоматического регулирования, которые требуют постоянной корректировки оператором. В таких условиях эффективность работы агрегата во многом зависит от квалификации оператора, его способности своевременно оценивать состояние отдельных зон печи и выбирать управляющие воздействия с учетом их взаимного влияния. Однако управление трубчатой вращающейся печью осложняется тем, что изменение одного управляющего параметра, направленное на стабилизацию режима в одной зоне, может вызвать нежелательные изменения в других зонах агрегата. Это приводит к нестабильности температурного профиля и, как следствие, к снижению степени извлечения глинозема из спека, увеличению расхода топлива, ускоренному износу футеровки, а также к избыточному формированию обмазки и колец.

В связи с этим актуальной научно-технической задачей является разработка системы усовершенствованного управления процессом спекания нефелинового концентрата с известняком, основанной на комплексной прогнозной модели трубчатой вращающейся печи и

экспертной базе правил. Прогнозная модель позволяет учитывать взаимосвязь тепловых, газодинамических, механических и физико-химических процессов, протекающих в агрегате, а экспертная база правил обеспечивает формализацию технологического опыта и выбор управляющих воздействий с учетом текущего состояния объекта управления.

2. Научная новизна диссертации

Научная новизна диссертационной работы состоит в развитии математического и алгоритмического обеспечения системы управления процессом спекания нефелинового концентрата с известняком в трубчатых вращающихся печах. В работе предложен подход, позволяющий учитывать изменение внутренней формы рабочего пространства агрегата, возникающее вследствие образования обмазки и колец, при расчете параметров движения сыпучего материала и формировании управляющих воздействий.

К результатам, обладающим научной новизной, следует отнести:

- установленную зависимость параметров осевого движения сыпучего материала от изменяющейся внутренней формы рабочего пространства трубчатой вращающейся печи по длине агрегата;
- разработанную математическую модель осевого движения сыпучего материала, позволяющую учитывать влияние внутренних геометрических изменений печи на высоту слоя материала и среднее время его пребывания в агрегате;
- предложенную структуру комплексной прогнозной модели процесса спекания нефелинового концентрата с известняком, объединяющей расчет движения материала, пылеуноса и пылевозврата, горения факела, теплообмена и химических превращений;
- разработанный алгоритм расчета комплексной прогнозной модели, предназначенный для оценки состояния технологического процесса;
- предложенную структуру системы управления процессом спекания, основанную на совместном использовании комплексной прогнозной модели и экспертной базы правил, что позволяет формировать управляющие воздействия с учетом состояния отдельных зон печи и их взаимного влияния.

3. Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, представленных в диссертационной работе, определяется корректной постановкой цели и задач исследования, последовательным переходом от анализа современного состояния вопроса к разработке математических моделей, экспериментальной проверке отдельных зависимостей и формированию структуры системы управления процессом спекания. Автор последовательно рассматривает трубчатую вращающуюся печь как объект управления, выявляет ограничения существующих систем автоматического регулирования, обосновывает необходимость применения прогнозной модели и экспертной базы правил, а затем разрабатывает

математическое и программное обеспечение, предназначенное для использования в системе усовершенствованного управления.

Для анализа влияния внутренней формы рабочего пространства на параметры движения материала автором разработана физическая модель вращающегося агрегата. Это позволило воспроизвести различные варианты изменения геометрии внутреннего пространства печи, возникающие при образовании обмазки и колец, и экспериментально оценить их влияние на высоту слоя материала и среднее время пребывания.

Достоверность разработанной математической модели осевого движения материала обеспечивается сопоставлением расчетных результатов с экспериментальными данными. В работе показано, что предложенная модель позволяет определять трудноизмеряемые параметры процесса – высоту слоя материала и среднее время пребывания материала в печи.

Комплексная прогнозная модель процесса спекания включает расчет основных процессов, определяющих состояние агрегата: осевое движения материала, унос и возврат пыли, горение факела, теплообмен в цепной зоне, химические превращения и теплообмен в зонах без внутренних теплообменных устройств.

Следует отметить, что достоверность полученных результатов подтверждается применением комплекса взаимодополняющих методов исследования. В работе использованы анализ научно-технической литературы и патентных материалов, физическое моделирование, лабораторные эксперименты, математическое моделирование, программная реализация расчетных алгоритмов, а также методы нечеткой логики.

Обоснованность экспертной базы правил определяется тем, что она сформирована с учетом технологических знаний, анализа литературных источников и результатов моделирования. Применение экспертной базы правил совместно с комплексной прогнозная моделью позволяет формализовать процесс выбора управляющих воздействий и снизить зависимость управления от субъективного опыта оператора.

Выводы, сформулированные в диссертации, являются логическим следствием поставленных задач, проведенных экспериментальных исследований, результатов математического моделирования и оценки эффективности предложенной системы управления. Практическая достоверность полученных результатов дополнительно подтверждается программной реализацией разработанных моделей и использованием результатов исследования в деятельности профильной организации.

4. Научные результаты, их ценность

Научные результаты диссертации представляют ценность для развития теории и практики управления сложными теплотехнологическими объектами с распределенными параметрами. В работе предложены модели и алгоритмические решения, позволяющие более полно описывать процесс спекания нефелинового концентрата с известняком в трубчатой вращающейся печи и использовать расчетные данные при выборе управляющих воздействий.

К числу наиболее значимых научных результатов следует отнести установление

зависимости параметров осевого движения сыпучего материала от изменяющейся внутренней формы рабочего пространства печи. Ценность данного результата состоит в том, что в модели учитывается влияние обмазки и колец, которые в реальных условиях эксплуатации изменяют геометрию агрегата, влияют на движение материала, высоту слоя и среднее время пребывания. Учет данного фактора позволяет приблизить математическое описание к реальным условиям работы трубчатой вращающейся печи.

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

5. Теоретическая и практическая значимость результатов диссертации

Теоретическая и практическая значимость результатов диссертационной работы определяется тем, что полученные автором результаты могут быть использованы при развитии методов моделирования и управления процессом спекания нефелинового концентрата с известняком в трубчатых вращающихся печах.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке математического описания осевого движения сыпучего материала во вращающемся цилиндрическом агрегате с учетом изменяющейся внутренней формы рабочего пространства. Данный результат позволяет учитывать влияние обмазки и колец на высоту слоя материала и среднее время пребывания материала в печи, что расширяет возможности моделирования процессов, протекающих в трубчатых вращающихся печах.

Практическая значимость результатов диссертации подтверждается следующими положениями:

- разработано устройство для автоматического определения динамического угла откоса сыпучего материала во вращающемся цилиндре, защищенное патентами на изобретение № 2849726 и № 2849725;
- разработана и 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; разработанные программные решения защищены свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2024662839 и № 2024662736;

- полученные результаты внедрены в АО «Моделирование и цифровые двойники» для моделирования движения материала в трубчатых вращающихся печах, а также для оптимизации параметров процесса спекания, что подтверждается актом о внедрении от 01.04.2026.

6. Рекомендации по использованию результатов работы

Результаты диссертационной работы рекомендуется использовать при разработке и модернизации программных модулей систем управления трубчатыми вращающимися печами, а также при создании расчетных инструментов для анализа состояния сложных теплотехнологических агрегатов. Практический интерес представляют разработанная модель движения сыпучего материала, учитывающая изменение внутренней формы рабочего пространства, комплексная прогнозная модель процесса спекания и предложенная структура системы управления на основе экспертной базы правил.

Полученные результаты могут быть рекомендованы для использования в организациях, занимающихся промышленной автоматизацией, математическим моделированием, цифровыми двойниками, металлургическим инжинирингом и разработкой программных решений для АСУ ТП. К таким организациям могут быть отнесены НИТУ МИСИС, Уральский федеральный университет, АО «Уралмеханобр», НПФ «КРУГ», «УльтимаТек», «ИндаСофт», а также другие профильные научные, проектные и инжиниринговые организации.

7. Замечания и вопросы по работе

1. Автором разработана программная реализация комплексной прогнозной модели. Следует пояснить, какое время занимает один расчет модели и достаточно ли оно для применения системы в оперативном режиме советчика.

2. В третьей главе печь разбивается на расчетные участки, однако влияние выбранного шага разбиения на точность расчета и вычислительную трудоемкость модели могло бы быть рассмотрено подробнее.

3. Автором предложена система управления для стабилизации температурного профиля. Следует пояснить, возможно ли применение предложенного подхода для других процессов в трубчатых вращающихся печах, например для цементных или известковых печей.

4. Разработанная система управления ориентирована на поддержку оператора, однако целесообразно было бы дополнительно рассмотреть вопросы удобства интерфейса, воспринимаемости рекомендаций и возможной адаптации системы к действиям конкретного оператора.

5. Почему в работе выбран режим советчика оператора, а не полностью автоматический режим управления?

6. Каким образом в промышленной эксплуатации предполагается получать текущий профиль внутренней формы рабочего пространства печи, необходимый для расчета модели осевого движения материала?

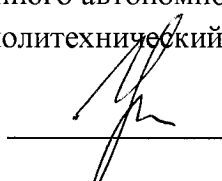
Высказанные замечания не снижают научной и практической значимости выполненной работы.

8. Заключение по диссертации

Диссертация «Система управления процессом спекания шихты в трубчатых вращающихся печах на основе прогнозной модели и экспертной базы правил», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами полностью отвечает требованиям раздела 2 «Положения о присуждении ученых степеней» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», утвержденного приказом ректора Санкт-Петербургского горного университета Екатерины II от 20.05.2021 № 953 адм, а ее автор **Моргунов Владимир Викторович** заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

Официальный оппонент

доктор технических наук, профессор, профессор и главный научный сотрудник Высшей школы технологий искусственного интеллекта, Института компьютерных наук и кибербезопасности Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»



Уткин Лев Владимирович

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Адрес: ул. Политехническая, д. 29 литера Б, Санкт-Петербург, 195251

Телефон: 8 (812) 775-05-30

E-mail: office@spbstu.ru

Подпись доктора технических наук, профессора и главного научного сотрудника Высшей школы технологий искусственного интеллекта, Института компьютерных наук и кибербезопасности Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» Уткина Льва Владимировича заверяю.

«11» 06 _____ 2026 г.

М.П.

