

Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К.И. Сатпаева

УДК: 681.516.3(043)

На правах рукописи

МУСАБЕКОВ НАЗАРБЕК РАСУЛБЕКОВИЧ

**Синтез гибридной системы управления сложным технологическим
комплексом медеплавильного производства**

6D070200 – Автоматизация и управление

Диссертация на соискание степени
доктора философии (PhD)

Научный консультант:
кандидат технических наук,
ассоц. профессор
Ибраев А.Х.

Соруководитель
доктор технических наук,
профессор
Утепбергенов И.Т.,

Зарубежный научный консультант
Associate professor, PhD (ассоц.
профессор, доктор PhD)
Andrzej Smolarz

Республика Казахстан
Алматы, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ	4
ОПРЕДЕЛЕНИЯ.....	5
ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ	6
ВВЕДЕНИЕ	7
1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР И ФОРМУЛИРОВАНИЕ КОНЦЕПЦИИ СОЗДАНИЯ ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ	14
1.1 Оценка технического состояния технологического комплекса медеплавиль- ного производства	14
1.1.1 Концепция и определение понятия гибридной системы	15
1.1.2 Структура гибридной системы управления	15
1.2 Нейро-нечеткие (гибридные) технологии интеллектуальных систем	18
1.3 Описание технологического процесса плавки Ванюкова	20
1.3.1 Описание технологии плавки медных концентратов в печи Ванюкова	20
1.3.2 Характеристика технологического комплекса плавки Ванюкова как объекта управления	22
1.3.3 Анализ современного состояния автоматизации процесса в печи Ванюкова	27
1.4 Постановка задач исследований	29
1.5 Заключение по разделу	29
2 РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ СИНТЕЗА ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПЛАВКИ ВАНЮКОВА КАК СЛОЖНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА	30
2.1 Разработка концепции синтеза гибридной систем управления.....	30
2.2 Описание программно-технических средств для гибридной системы управления в промышленных условиях	33
2.3 Существующая практика управления режимами в ТК ПВ на Балхашском медеплавильном заводе.....	35
2.4 Заключение по разделу.....	37
3 РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И АЛГОРИТМА ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПЛАВКОЙ ВАНЮКОВА.....	38
3.1 Математическое описание технологического режима.....	38
3.2 Математическая модель технологического комплекса.....	39
3.2.1 Структура модели технологического режима комплекса	41
3.2.2 Структура модели теплового режима комплекса	45
3.3 Реализация компьютерной модели управления тепловым и материальным режимами процесса плавки	47
3.4 Постановка задачи синтеза гибридного управления	50
3.5 Разработка алгоритма синтеза системы управления сложным техноло- гическим комплексом плавки Ванюкова.....	50
3.6 Заключение по разделу.....	52

4 СИНТЕЗ МОДЕЛЕЙ И АЛГОРИТМОВ ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА И ОБРАБОТКИ БОЛЬШИХ ДАННЫХ.....	53
4.1 Анализ и обработка больших данных процессов в ПВ на БМЗ.....	53
4.2 Обработка полученных опытных данных и на их основе выполнение параметрической идентификации математической модели.....	57
4.3 Заключение по разделу.....	76
5 ИСПЫТАНИЕ И ПРОМЫШЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОТОТИПА МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫМ РЕЖИМОМ.....	77
5.1 Разработка системы контроля теплового режима в печи Ванюкова на основе экспериментального метода в программе Comsol Multiphysics.....	77
5.2 Математическое описание теплового режима в печи Ванюкова	78
5.3 Выбор программного обеспечения для реализации модели	81
5.3.1 Моделирование теплопередачи в физической модели	82
5.4 Исследование физической модели при изменении режимов работы	94
5.5 Прогнозирование параметров с помощью нейросети	95
5.6 Исследование на устойчивость теплового режима печи с применением регуляторов	98
5.7 Заключение по разделу.....	109
ВЫВОДЫ И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ.....	110
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	111
ПРИЛОЖЕНИЕ А – Экспериментальные данные.....	116
ПРИЛОЖЕНИЕ Б – Результаты моделирования в Comsol Multiphysics.....	118
ПРИЛОЖЕНИЕ В – Результаты эксперимента нагрева шамотного кирпича, при перепадах тем-пературы.....	121
ПРИЛОЖЕНИЕ Г – Акт внедрения результатов диссертации.....	123
ПРИЛОЖЕНИЕ Д – Справка о выполнении научно-экспериментальных работ диссертационных исследований.....	125

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В настоящей диссертации использованы нормативные ссылки на следующие документы и стандарты:

- «Инструкция по оформлению диссертации и автореферата», ВАК МОН РК, №377-3ж.

- ГОСТ 7.32-2001 – Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления.

- СТ КазННТУ-09-2017. Общие требования к построению, изложению, оформлению и содержанию текстового и графического материала.

- ГОСТ 7.1-2003. Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В настоящей диссертации применяются следующие термины и соответствующие определения:

Автоматизированные системы управления (АСУ) – системы, контролирующие и управляющие основными механизмами и оборудованием в процессе, такие как печи, насосы и транспортные системы.

Гибридная система – объединенная информационным процессом совокупность технических средств и программного обеспечения, способная на основе сведений и знаний при наличии мотивации синтезировать цель, вырабатывать решение о действии и находить рациональные способы достижения цели.

Интеллектуальная система управления – система, основанная на обработке информации и знаний, способная принимать решения и управлять процессами на основе анализа данных и собственного состояния.

Интеллектуальные алгоритмы управления – алгоритмы, способные адаптироваться к изменениям в процессе и оптимизировать параметры в реальном времени для улучшения качества продукции и энергоэффективности.

Материальный баланс – уравнения, учитывающие входные и выходные потоки всех веществ, участвующих в процессе.

Медеплавильное производство – производство металлов путем плавления металлических материалов в печах и конвертерах.

Отходящие газы – газообразные продукты, содержащие различные компоненты, такие как CO, CO₂, CH₄, N₂, O₂ и др.

Пыль – частицы, содержащие основные компоненты входных и выходных материалов.

Тепловой баланс – уравнения, учитывающие все источники тепловыделения и теплопоглощения, а также потери тепла.

Техническое состояние – состояние технологического комплекса, оцениваемое по параметрам и характеристикам его работы, включая эффективность, производительность и качество производимой продукции.

Угар – содержание вредных компонентов в отходящих газах, выраженное в долях от количества компонентов во входных материалах.

Экспертная система – система, способная на основе базы знаний производить экспертную оценку, принимать решения о действии и прогнозировать результаты действия.

Шихта – смесь различных материалов, таких как концентрат, уголь, шихта, клинкер, используемых в процессе плавки.

Шлак – продукт плавки, содержащий компоненты FeO, CaO, SiO₂, MgO и др.

Штейн – продукт плавки, содержащий различные элементы, такие как Cu, Fe, S, Zn, P и др.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

ПВ	– плавка Ванюкова;
ТК ПВ	– технологический комплекс плавки Ванюкова;
ИС	– интеллектуальные системы;
ПЖВ	– плавка в жидкой ванне;
АСУТП	– автоматизированная система управления технологическим процессом;
БМЗ	– Балхашский медеплавильный завод;
ИТ	– информационные технологии;
ИСУ	– интеллектуальные системы управления;
ГСУ	– гибридные системы управления;
ЭС	– экспертные системы;
НА	– нечеткие алгоритмы;
НС	– нейронные сети;
ИС	– инструментальные средства;
ННС	– нейро-нечеткие сети;
HDR	– high dynamic range
IP	– internet protocol
ЛАТР	– лабораторный автотрансформатор
ТДС	– температурный датчик сопротивления
ПК	– персональный компьютер
ПО	– программное обеспечение
CAD	– computer-aided design
ПЛК	– программируемый логический контроллер
АСУТП	– автоматизированная система управления технологическим процессом
NPV	– net present value
НСХ	– номинальная статическая характеристика
ТС	– технические средства
RTD	– резистивный датчик температуры
AC/DC	– alternating current/direct current
CF	– cash flow
LED	– light emitting diode
USB	– universal serial bus
ОЗУ	– оперативное запоминающее устройство
HDD	– hard disk drive
ГОСТ	– государственный стандарт
ИК	– измерительный канал
СКО	– среднее квадратическое отклонение
ПИД	– пропорционально-интегрально-дифференцирующий

ВВЕДЕНИЕ

Общая характеристика работы. Широкое распространение и стремительное развитие современных методов управления сложными технологическими комплексами, таких как интеллектуальные технологии привело к значительному росту публикаций по практическому применению этих методов при создании систем управления. В частности, в области цветной и черной металлургии, нефтехимии, энергетики и т.д., данные методы позволяют более рационально использовать минеральные ресурсы, экономить тепловую и электрическую энергию, снижать экологические проблемы, повышать экономическую отдачу от производства. Одним из наиболее перспективных пирометаллургических процессов плавки сульфидного полиметаллического сырья является сложный технологический комплекс «Плавка Ванюкова», относящаяся к классу «автогенных» процессов, которые предусматривают эффективное использование тепла, выделяющегося при окислении сульфидов металлов и тем самым позволяют снизить расход топлива на плавление шихты [1, 2].

В настоящем времени промышленные печи Ванюкова, предназначенные для осуществления плавки в жидкой ванне, успешно эксплуатируются на Балхашском медеплавильном заводе, входящем в состав корпорации «Казахмыс», расположенном в Казахстане. Аналогичные технологии реализуются также на предприятиях ОАО «ГМК „Норильский никель“» и Средне-Уральском медеплавильном заводе (СУМЗ) на территории России. Эта технологическая методика демонстрирует значительный потенциал в области цветной и черной металлургии. Ключевыми преимуществами процессов, реализуемых в печах Ванюкова, по сравнению с другими автогенными методами, являются: возможность непрерывного ведения технологического процесса, плавка сырья с влажностью до 8 %, использование кускового шихтового материала, высокая удельная производительность, снижение пылевыноса, повышение эффективности физико-химических преобразований внутри расплава, минимальное содержание ценных компонентов в отходящих шлаках, возможность производства «богатого» штейна и продувочных газов, таких как диоксид серы, а также утилизация выделяемого теплового потенциала и другие преимущества.

Технологический комплекс для плавки медных концентратов в печи Ванюкова (ТК ПВ) включает несколько технологических переделов и оборудования: подготовительный участок с шихтоподготовительным агрегатом (штабельный шихтарник), саму печь Ванюкова с конвейерными линиями, бункеры и питатели для загрузки сырья, а также «сифоны» для вывода продуктов плавки. В дополнение – электроотстойник для шлака, котел-утилизатор, газоходы для отвода отходящих серосодержащих газов и их последующей подачи на сернокислотное производство. В процессе штейн направляется в конвертерное отделение для получения черновой меди, а после электроотстойника отходящий шлак удаляется в отвал [3].

Автоматизированная система управления технологическими процессами (АСУ ТП) ТК ПВ на Балхашском медеплавильном заводе была разработана и внедрена одновременно с возведением и вводом в эксплуатацию первого производства комплекса Ванюкова в конце 1980-х годов. Изначально система была реализована с использованием современных для того времени средств автоматизации и управляющих ЭВМ третьего поколения (СМ-2М и ТВСО). В дальнейшем она была тиражирована для второго производственного комплекса. В настоящее время на Балхашском заводе функционирует автоматизированная система управления технологическим процессом металлургического комплекса Ванюкова, основанная на современной микропроцессорной технике и реализующая трехуровневую архитектуру. Нижний («полевой») уровень включает контрольно-измерительные приборы и запорную регуляторную арматуру, средний технологический уровень реализован в виде систем контроля и управления безщитового типа, а верхний уровень представлен системой SCADA, обеспечивающей визуализацию и управление на операторском уровне [4]. Управление процессом ПВ осуществляется оператором (мастером смены) в соответствии с технологической инструкцией на основе опыта, интуиции и субъективного анализа текущих показаний контрольно-измерительных приборов (температуры, расходы, давления, разрежения и прочие переменные, в различных точках по агрегатам и материальным потокам, положение исполнительных механизмов и запорной аппаратуры), результатов химических анализов, поступающих со значительным запаздыванием, а также данных визуальных наблюдений обслуживающего персонала (уровень расплава, состояние поточно-транспортной системы, бункеров, трубопроводов, газоходов и другого оборудования). Разнообразие возникающих производственных ситуаций, различная квалификация персонала, сложность ТК ПВ, относящегося к классу стохастических, многомерных, нестационарных объектов, обуславливают невозможность, в условиях существующей системы автоматизации, качественного управления комплексом, что приводит к отклонению показателей процессов от заданных, сбоям в работе оборудования, непроизводительным остановкам и потерям, а также возникновению аварийных ситуаций [3, 4, 5].

Непрерывный характер производства и технологические ограничения на режимы работы оборудования предъявляют жесткие требования к системе управления комплексом в части согласования нагрузок смежных переделов и обеспечения эффективного функционирования отдельных процессов и комплекса в целом.

Разработка автогенных процессов осуществлялась в период активного внедрения в производство технических средств и систем автоматизации и использования методов математического моделирования в научных исследованиях. При внедрении «плавки Ванюкова» наряду с физико-химическими исследованиями и отработкой конструктивных параметров и режимных показателей ТК ПВ, включая смежное оборудование, проводились работы по построению математических моделей процесса и использованию их в системах управления, ко-

которые разрабатывались одновременно с освоением новой технологии. Такие работы проводились на медных заводах Норильского и Балхашского горнометаллургических комбинатах [3-8].

Во всех работах по созданию систем автоматизации предполагалось использовать математические модели для целей эффективного управления процессами ПВ, однако по ряду объективных причин, связанных, главным образом, с низким уровнем технических средств автоматизации и ограниченными возможностями советских управляющих ЭВМ того поколения, эти цели не были реализованы.

В последние годы широкое распространение получили интеллектуальные технологии и системы, формализующие опыт и знания экспертов по управлению технологическими процессами. В, частности, в работе Сулейменова Б.А. [9], приведен обзор и подробно описаны достоинства интеллектуальных технологий и их применение для управления различными химико-металлургическими процессами.

Различным аспектам применения интеллектуальных технологий для управления процессами автогенной плавки, включая плавку Ванюкова, посвящены работы [9 - 12].

Актуальность диссертационной работы:

Актуальность диссертационной работы связана с решением следующих задач, которые приводят к повышению эффективности производства и конкурентоспособности:

1. Управление комплексом, а не отдельными процессами: работа посвящена разработке системы управления не отдельным процессом, а взаимосвязанным технологическим комплексом медеплавильного производства, включающим шихтовку, плавку и утилизацию тепла отходящих газов.

2. Учет требований смежных производств: система управления учитывает требования конвертерного отделения медеплавильного цеха и сернокислотного цеха.

3. Использование математических и интеллектуальных моделей: для формирования экспертных заключений, расширения информационной базы принятия решений и создания системы управления с использованием прогнозирующих моделей и «виртуальных» датчиков.

Задача управления технологическим комплексом расширяет возможности управления, используя более высокоуровневые критерии оптимизации с выдачей заданий отдельным процессам.

Цель диссертационной работы:

Синтез эффективной гибридной системы управления медеплавильным производством, позволяющий перейти на высокоуровневый критерий оптимизации, учитывающий задания для основных процессов.

Основная идея работы:

Разработка алгоритмов и модели управления на основе интеллектуальных и гибридных технологий, накопленные знания, учитывающие опыт и интуицию операторов-технологов и данные, получаемые в режиме реального времени.

Преимущества:

- сокращение сроков разработки системы управления;
- повышение точности и эффективности системы управления.

Задачи исследования:

1. Оценка технического состояния технологического комплекса медеплавильного производства и формулирование концепции создания гибридной системы управления на основе аналитического обзора.
2. Теоретическое обоснование основы синтеза гибридной системы управления плавки Ванюкова (ПВ) как сложного технологического комплекса.
3. Разработка структуры математической модели гибридной системы управления технологическим комплексом медеплавильного производства.
4. Синтез моделей и алгоритмов управления на основе анализа и обработки больших данных технологического комплекса медеплавильного производства.
5. Испытание прототипа гибридной системы управления и исследование на чувствительность, устойчивость, однозначность и оценка ее адекватности.

Объект исследования:

Объектом исследования является сложный технологический комплекс плавки медных концентратов в Балхашком медеплавильном заводе.

Методы исследований:

Для решения поставленных задач в работе используются методы математического моделирования, оптимизации технологических процессов, методы идентификации и методы статистической динамики.

В качестве инструментов моделирования использовались современные пакеты прикладных программ MATLAB: пакеты Fuzzy Logic Toolbox и System Identification Toolbox и Comsol Multiphysics.

Научная новизна работы:

В диссертационной работе были разработаны и представлены следующие научные положения, отличающиеся уникальными характеристиками:

1. Впервые рассматривается задача управления не отдельным процессом, а взаимосвязанным технологическим комплексом, включающим последовательные переделы с учетом требований смежных производств.
2. Разработан гибридный подход и алгоритм управления ПВ, совмещающий накопление и обработку больших данных и знаний для формулирования базы правил.

На защиту выносятся следующие научные положения:

- методы и средства разработки гибридных моделей процесса управления объектом;
- структура математической модели, описывающей процессы, протекающие в надфурменной зоне и зоне отстоя продуктов плавки;
- инструментальные средства интеграции промышленного контроллера со средой моделирования и статистической оценки параметров модели пакета Matlab;

- полученные экспериментальные данные и проведенные испытания интеллектуальных алгоритмов управления в промышленных условиях Балхашского медеплавильного завода;

- модель, реализованная в программе Comsol Multiphysics для оценки теплового режима комплекса в агрессивных средах.

Практическая значимость результатов проведенных исследований:

Процесс плавки сульфидного сырья в печи Ванюкова является одним из наиболее прогрессивных процессов в цветной металлургии. Однако широкое использование его в мировой практике весьма ограничено, что связано, главным образом, с отсутствием эффективной системы автоматического управления. В Казахстане для металлургического комплекса ТОО «Казцинк» был выбран другой автогенный процесс ISASMELT™, по лицензии австралийской фирмы «Xstrata», система автоматизации которого поставляется «под ключ», и включает, помимо традиционного контроля и регулирования процесса, ряд расчетных модулей, обеспечивающих выбор наилучших режимов на основе математических моделей.

Предложенные методы и инструментальные средства:

- открывают возможности для создания интеллектуальных и гибридных систем управления для широкого спектра сложных технологических процессов;
- в контексте плавки Ванюкова будут способствовать внедрению данного метода на отечественных и зарубежных предприятиях цветной металлургии.

Разработанная система управления ПВ:

- обеспечит более эффективное ведение технологического процесса;
- позволит снизить расходы на его проведение;
- сократит объемы вредных выбросов;
- приведет к значительному экономическому и экологическому эффекту.

Полученные результаты:

- позволят создать надежный (проверенный на практике) инструмент для разработки интеллектуальных и гибридных систем оптимального управления сложными технологическими процессами;
- могут быть применены для создания аналогичных систем для различных технологических объектов в разных сферах экономики Казахстана и мира.

Оценка ожидаемого экономического эффекта: возможна только после проведения испытаний предлагаемых алгоритмов управления в промышленных условиях предприятия.

Конкретное личное участие автора в получении научных результатов заключается в следующем:

- постановке задач исследований и способа их реализации;
- проведении обследования объекта управления, сборе экспертных заключении опытных операторов-технологов для моделирования процессов управления;
- проведении корреляционного анализа обработки экспериментальных данных и разработке структуры математической модели, описывающей

процессы, протекающие в надфурменной зоне печи ПВ и зоне расслоения продуктов плавки (зона отстоя)

- проведении исследования разработанных моделей управления на чувствительность, устойчивость, однозначность и оценке степени их адекватности;

- разработке физической модели устройства контроля температуры в агрессивных средах, реализованная с помощью программной платформы Comsol Multiphysics, позволяющая оценить тепловой режим комплекса;

- проведении испытания интеллектуальных алгоритмов управления в промышленных условиях на Балхашском медеплавильном заводе.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на отечественных и зарубежных научных конференциях: международной научной конференции «Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании» (CITech-2015, г.Алматы-Новосибирск: КазНУ, 2015); Международных Сатпаевских чтениях «Роль и место молодых ученых в реализации новой экономической политики Казахстана» (г.Алматы: КазНТУ, 2016); зарубежной научной конференции «Conference Lubelskie Dni Nauki i Biznesu WD 2016» (г.Люблин, 2016); международной научной конференции «Европейская наука 21 века - 2016»; зарубежной научной конференции «Environmental Engineering V: Proceedings of the fifth National Congress of Environmental Engineering» (г.Люблин, 2016).

Публикации. Основные результаты исследований опубликованы в 13 печатных работах, из них 8 статей в международных научных конференциях, в том числе 4 в зарубежных конференциях (г.Люблин, Польша), 1 статья в инженерно-техническом журнале, 2 статьи в изданиях, рекомендованных Комитетом по обеспечению качества в сфере науки и высшего образования МНВО РК и 3 статьи в международных рецензируемых научных журналах, входящие в БД Scopus/Web of Science.

Структура и объем диссертации: Диссертация состоит из введения, четырех глав основного содержания, раздела основных выводов и результатов, списка использованных источников из 63 наименований и 5 приложений. Работа содержит 125 страниц, 50 рисунков и 10 таблиц.

В первом разделе работы дана общая характеристика технического состояния технологического комплекса медеплавильного производства, включая описание процесса плавки Ванюкова как объекта управления. Приводятся общие сведения о гибридных системах управления и описание достоинства и недостатков интеллектуальных технологий при создании гибридных систем управления металлургическими процессами. Также представлено технологическая и структурная схема комплекса плавки Ванюкова и анализируется современное состояние автоматизации данного процесса. Кроме того, в разделе сформулированы цель и основные задачи исследований и общая методика научно-исследовательской работы.

Во втором разделе предложена общая концепция создания гибридной системы управления, описание математической модели кинетики химических

реакций, описание гидродинамической модели. Кроме того, дается сравнительный анализ существующих систем управления различными металлургическими процессами с целью обоснования выбора управления технологическим процессом «плавка Ванюкова».

В третьем разделе представлено математическое описание технологического режима, разработана математическая модель технологического комплекса, включая структуру модели технологического и теплового режимов. Затем описывается реализация компьютерной модели для управления тепловыми и материальными режимами процесса плавки. После этого формулируется задача синтеза гибридной системы управления. В заключение разрабатывается алгоритм для синтеза системы управления сложным технологическим комплексом плавки Ванюкова. Данный раздел охватывает все от основных математических уравнений до конкретных алгоритмов управления.

В четвертом разделе в условиях Балхашского медеплавильного завода получены большие данные технологического комплекса печи Ванюкова, проделан анализ и на их основе выполнена параметрическая идентификация математической модели. Обоснован выбор технологических режимов и управление процессом плавки медных концентратов. Разработана структура гибридной системы управления ТК ПВ.

В пятом разделе проводится испытание прототипа гибридной системы управления и промышленное исследование. Разрабатывается система контроля теплового режима в печи Ванюкова на основе экспериментального метода в программе Comsol Multiphysics. Затем представляется математическое описание теплового режима в печи Ванюкова. Далее происходит выбор программного обеспечения для реализации модели и моделирование теплопередачи в физической модели. Исследуется физическая модель при изменении режимов работы. Прогнозируются параметры с помощью нейросети. В заключение проводится исследование на устойчивость теплового режима печи с применением регуляторов.

В заключении диссертации по результатам представленных разработок и исследований сформулированы основные выводы работы.

В приложениях диссертации представлены экспериментальные данные, результаты моделирования в Comsol Multiphysics, результаты эксперимента по нагреву шамотного кирпича при различных температурных условиях, документация, подтверждающая внедрение результатов исследования в практику, а также справка о выполнении научно-экспериментальных работ, связанных с диссертационными исследованиями.

1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР И ФОРМУЛИРОВАНИЕ КОНЦЕПЦИИ СОЗДАНИЯ ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

1.1 Оценка технического состояния технологического комплекса медеплавильного производства

На Балхашском медеплавильном заводе (БМЗ) реализуется контроль технологических режимов процесса плавки Ванюкова посредством регулирования таких параметров, как объем подачи дутья и его содержание кислорода, а также параметры, характеризующие объем и состав загружаемых компонентов: концентратов, угля, клинкера и конвертерных шлаков [13]. Это позволяет эффективно контролировать процесс плавки и обеспечивает высокую производительность.

В целом, в странах СНГ активно развивается медеплавильное производство. Например, в Казахстане и Китае планируется строительство нового медеплавильного завода мощностью 300 тыс. тонн меди в год. Это свидетельствует о высоком уровне технического состояния и перспективности развития медеплавильного производства в СНГ. В области медеплавильного производства проводятся активные исследования. Например, российские ученые разрабатывают технологию безотходной переработки медьсодержащих шлаков. Это позволяет не только повысить эффективность процесса, но и снизить его воздействие на окружающую среду [14].

Тем не менее, основное направление применения гибридных систем управления связано с регулированием сложных технологических комплексов, которые в настоящее время затруднительно формализовать с помощью традиционных методов математического моделирования. Значительная часть объектов металлургической, энергетической, химической и нефтехимической индустрии относится к числу систем с низкой степенью формализации. Управление такими объектами осуществляется преимущественно операторами-технологами, обладающими обширными знаниями и практическим опытом, способными принимать самостоятельные решения даже в условиях неопределенности входных параметров [15]. Например, для ряда плавильных агрегатов недостаточно точного прогнозирования или измерения некоторых ключевых технологических характеристик. В связи с этим решения оператора основаны преимущественно на интуиции, субъективных оценках, а также на накопленных знаниях и опыте. Высокая зависимость от человеческого фактора сказывается на общей эффективности процесса плавки, зачастую ведет к росту потребления энергетических ресурсов и снижению качества продукции [16].

Использование экспертных систем способствует интеграции опыта квалифицированных операторов с возможностями автоматизированных систем управления. В рамках интеллектуальных автоматизированных систем управления реализуются методы и алгоритмы сбора и обработки данных, обеспечивающие решение таких задач как: выявление объективных закономерностей на фоне разнородной информации; принятие решений в

условиях неопределенности; воспроизведение неформализованных управленческих практик экспертов; автоматическое пополнение и актуализация базы знаний по эксплуатации системы; а также обучение операторов наиболее эффективным методам управления [15-16].

1.1.1 Концепция и определение понятия гибридной системы

Развитие высокопроизводительных микропроцессоров с увеличенной емкостью памяти, а также возможность организации мультипрограммных сетей для осуществления параллельных вычислительных процессов, наряду с необходимостью обработки больших массивов данных и использованием базы знаний для формирования целенаправленных действий, существенно способствовали возникновению интеллектуальных систем [17].

В рамках данной диссертационной работы под понятием «гибридная система» понимается интегрированная совокупность технических средств и программных средств, объединенных посредством информационного процесса, функционирующая как во взаимодействии с человеком (или коллективом специалистов), так и в автономном режиме. Такая система обладает способностью на основе накопленных данных и знаний, при наличии соответствующей мотивации, осуществлять синтез цели, формировать решения о действиях и находить наиболее рациональные методы достижения поставленных задач.

1.1.2 Структура гибридной системы управления

Рассмотрим структуру такой системы (см. рисунок 1.1) [17].

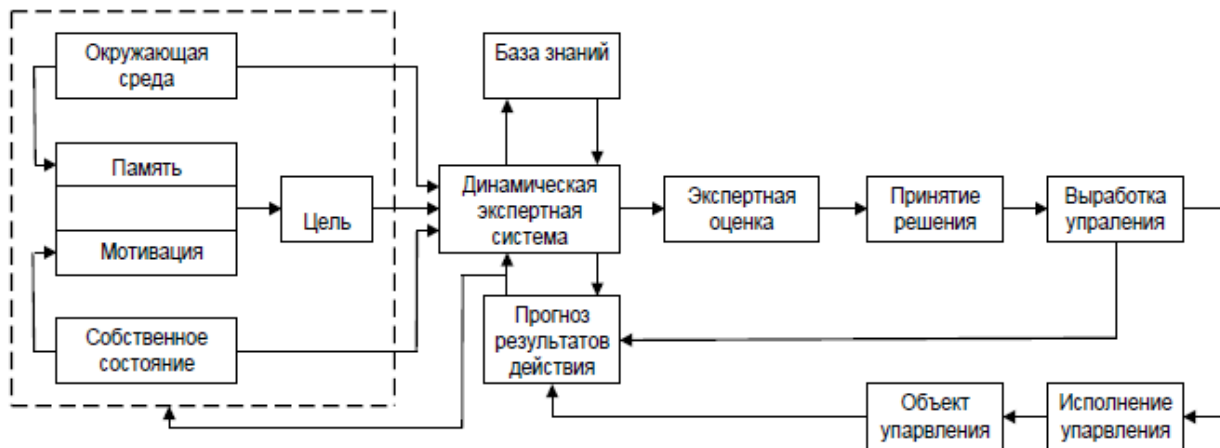


Рисунок 1.1 - Структурная схема гибридной системы

На основе данных об окружающей среде и внутреннем состоянии системы, с учетом наличия памяти и мотивационной характеристики, формулируется цель, воспринимаемая совместно с другими информационными потоками динамической экспертной системой. Эта система посредством базы знаний осуществляет экспертную оценку, на основе которой принимается решение о

конкретных действиях и осуществляется прогнозирование результатов их выполнения (так называемый механизм акцептора действия) [17]. В соответствии с принятым решением разрабатывается управление, представляющее собой синтез соответствующего алгоритма или закона управляющих воздействий, реализуемого с помощью различных исполнительных устройств и непосредственно воздействующего на объект управления. Полученные результаты воздействия сравниваются с прогнозируемыми значениями, что реализуется через механизм обратной связи и служит функцией акцептора действия [17].

При обнаружении несоответствия между фактическими и ожидаемыми результатами принимается новая экспертная оценка, на основе которой разрабатывается и реализуется корректирующее управление, устраняющее выявленное несоответствие. В случае соответствия текущих результатов предыдущему управлению оно закрепляется и продолжается. Если же достижение соответствия невозможно, процессы уточнения цели иницируются для корректировки дальнейших действий. Такая структура обладает инвариантностью относительно конкретных характеристик объекта управления и обладает универсальным характером [17].

Гибридные системы характеризуются способностью к синтезу цели, принятию решений относительно действий, обеспечению исполнения управляющих воздействий, прогнозированию параметров результатов и сопоставлению их с реальными значениями, что создает регулярную обратную связь и позволяет корректировать как цель, так и управление [17]. Гибридные системы управления часто используют адаптивные алгоритмы и методы машинного обучения для оптимизации работы и адаптации к изменяющимся условиям. Они могут включать в себя цифровые двойники для моделирования и прогнозирования поведения технологического комплекса [17].

На рисунке 1.2 приведена схема, представляющая собой модель целенаправленного управления и включающая два ключевых блока: синтез цели и ее реализация.

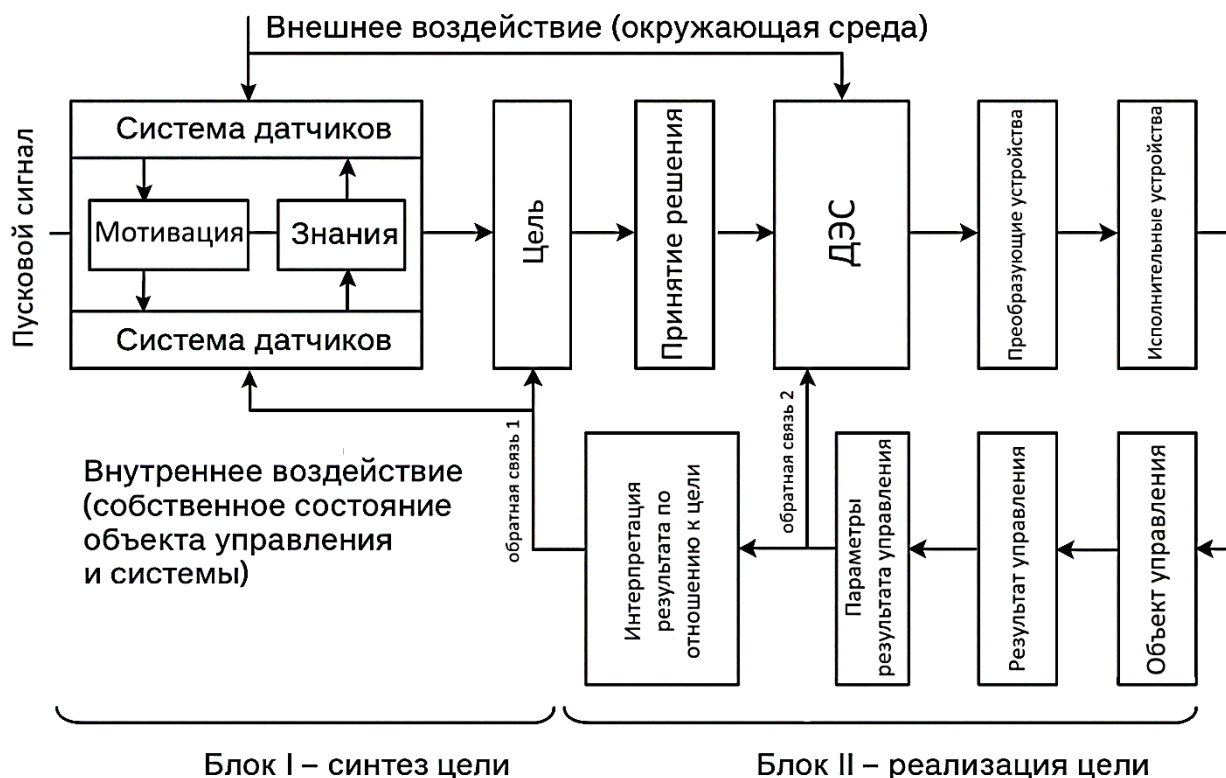


Рисунок 1.2 - Модель целенаправленного управления гибридной системой

В первом блоке осуществляется активная оценка входной информации, поступающей от системы датчиков. При наличии мотивации и имеющихся знаний происходит синтез целевой установки и принятие решения о предстоящем действии. Даная активизация оценки инициируется под воздействием пусковых сигналов. Изменения внешней среды и внутреннего состояния системы могут создавать потребность в определенных действиях (мотивацию), а при наличии соответствующих знаний — способствуют формированию цели. В рамках научной области под целью понимается идеальное мысленное прогнозирование результата осуществляемых действий, направленных на ее достижение, что является основой для формирования стратегий поведения человека или системы. Постоянное активное оценивание информации о внешних условиях и внутреннем состоянии объекта управления, а также сопоставление альтернативных вариантов достижения цели позволяет принимать обоснованные решения о дальнейшем воздействии [18].

На следующем этапе, во втором блоке, функционирует динамическая экспертная система (ДЭС), которая на основе текущих данных о состоянии окружающей среды и системы принимает решение о управлении при наличии установленной цели. В случае отсутствия полной информации или знаний система осуществляет экспертную оценку. На основании анализа полученной информации ДЭС прогнозирует возможные результаты воздействия и генерирует управляющие воздействия. Кодированное управление передается исполнительным устройствам системы, преобразуясь в физические сигналы. Объект управления, получая управляющие сигналы, реализует соответствующие действия, параметры которых возвращаются по обратной связи в ДЭС для

сравнения с прогнозными данными. Параметры итогов воздействий интерпретируются в соответствии с характеристиками поставленной цели и могут использоваться для оценки достигнутого результата с учетом эмоциональных аспектов: например, если поставленная цель достигнута, но результат не соответствует ожиданиям, управление может быть скорректировано. В случае полного соответствия параметров управление закрепляется, иначе происходит его корректировка. При невозможности достижения текущей цели система способна организовать синтез новой цели и соответствующую ей стратегию. Следует отметить, что при внезапных изменениях внешней среды, состояния системы или самого объекта управления возникает необходимость в формировании новой цели и ее реализации. Структура интеллектуальной системы при этом включает как традиционные компоненты, так и новые элементы, среди которых центральное место занимает динамическая экспертная система [18].

1.2 Нейро-нечеткие (гибридные) технологии интеллектуальных систем

Программные средства, используемые в системах управления, подразделяются на две основные категории: традиционные решения, основанные на стандартных вычислительных процедурах, и системы, относящиеся к классу искусственного интеллекта, или интеллектуальные системы [19]. В качестве характерных примеров современных интеллектуальных методов можно привести экспертные системы и нейронные сети. В целом, выбор конкретного программного обеспечения обусловлен требованиями предметной области, а также косвенно — затратами на его разработку. Например, система G-2, активно использующая современные информационные технологии, обеспечивает решение широкого спектра задач управляющих процессов, однако ее практическое применение затруднено в случае задач прикладного характера, не только из-за высокой стоимости реализации, но и из-за значительных аппаратных требований. Известная система СИАМ, базирующаяся на традиционных вычислительных процедурах, к сожалению, ограничена рамками моделирования узкого круга задач, что сказывается на ее применимости, преимущественно, в образовательных целях. Более универсальная система моделирования на базе MATLAB и Simulink предоставляет возможности для работы с разнообразными объектами и методологическими подходами, включая использование элементов искусственного интеллекта (например, NeuralNetwork Toolbox, FuzzyLogic Toolbox). Однако сложности, возникающие при интеграции системы с реальными объектами и с отдельными программными компонентами, существенно ограничивают область ее применения задачами моделирования [19].

Тем не менее, имеются целый ряд задач управления, при которых информация об объекте характеризуется неполнотой, неточностью или нечеткостью, что затрудняет использование стандартных вычислительных

методов и зачастую ведет к низкой эффективности или невозможности получения качественного результата. Кроме того, сложность взаимосвязи между входными и выходными параметрами может быть настолько высокой, что традиционные методы моделирования становятся недостаточно подходящими или полностью недопустимыми. В подобных случаях целесообразно применение нейросетевых технологий, которые обладают способностью эффективно работать с неопределенной и неструктурированной информацией [19].

Нечеткие нейронные сети и их гибридные вариации изначально разрабатывались с целью объединения преимуществ нейронных сетей и систем нечеткого вывода [19]. В рамках данного подхода, такие сети позволяют формировать модели систем в виде правил нечетких продукций, обладающих высокой наглядностью и легкостью интерпретации содержимого. Одновременно, для генерации правил нечетких продукций применяются методы нейронных сетей, что значительно упрощает и ускоряет процесс их построения для системных аналитиков. В последнее время, аппарат нейро-нечетких сетей получил широкое признание среди специалистов как один из наиболее перспективных инструментов для решения задач прикладного системного анализа, связанных с обработкой объектов с слабо или плохо структурированными данными.

Конструктивно, нейро-нечеткая сеть представляет собой многослойную структуру без обратных связей, в которой используются стандартные (не нечеткие) сигналы, веса и функции активации. В операциях суммирования применяются фиксированные Т-нормы, Т-конормы или иные непрерывные функции, что обеспечивает гибридный режим работы. Значения входных, выходных параметров и весов таких сетей находятся в диапазоне (0, 1), что соответствует обработке вещественных чисел в пределах данного интервала [20].

Закономерность работы таких сетей базируется на использовании существующей обучающей выборки для настройки параметров функций принадлежности так, чтобы они максимально отражали свойства системы с нечетким выводом. При этом параметры функций принадлежности оптимизируются посредством известных методов обучения нейронных сетей. В пакете FuzzyLogicToolbox для MATLAB реализована схема нейро-нечетких сетей в виде адаптивной системы нейро-нечеткого вывода, называемой ANFIS. Эта гибридная структура представляет собой нейронную сеть с одним выходом и несколькими входами, соответствующими нечетким лингвистическим переменным; термы входных переменных моделируются стандартными для MATLAB функциями принадлежности, а термы выходной переменной зачастую – линейными или постоянными функциями [20].

Кроме того, ANFIS представляет собой систему нечеткого вывода типа Сугено нулевого или первого порядка, где каждое правило нечетких продукций обладает постоянным весом, равным 1. Пользователь системы MATLAB имеет возможность редактировать и настраивать такие гибридные сети, а также осуществлять их параметры и структуру в аналогии с системами нечеткого

вывода, применяя все доступные средства, предоставляемые пакетом FuzzyLogicToolbox [20].

1.3 Описание технологического процесса плавки Ванюкова

При анализе технологии переработки медных концентратов в печи Ванюкова важно подчеркнуть, что данный технологический процесс является сравнительно не новым, но на данный момент недостаточно подробно изученным и внедренным лишь на ограниченном числе предприятий цветной металлургии в мировой практике. В связи с этим целесообразно рассмотреть эволюцию преобразования существующих автогенных пирометаллургических методов в инновационный, более эффективный технологический процесс плавки концентратов в жидкой ванне, получивший название в честь его автора - процесса Ванюкова [20, 21]. Необходимо также выделить основные отличительные характеристики данного процесса - плавки в печи Ванюкова (ПВ).

На сегодняшний день выполнены исследования, связанные с моделированием гидродинамической обстановки в ПВ, что имеет важное значение для углубленного понимания специфики данного процесса и может способствовать развитию систем автоматического управления. В этом разделе рассматриваются все три ключевых аспекта нового металлургического метода «процесса плавки в жидкой ванне (ПЖВ)» [21].

1.3.1 Описание технологии плавки медных концентратов в печи Ванюкова

Процесс плавки в жидкой ванне (ПЖВ), благодаря ряду принципиальных отличий, обладает очевидными инновационными преимуществами, среди которых выделяются [21]:

- высокий удельный коэффициент проплавки и потенциал для формирования агрегатов значительной мощности;
- снижение содержания металла в шлаках;
- уменьшение пылевыноса;
- сокращение расхода огнеупорных материалов;
- возможность переработки влажных концентратов и кусковой руды без необходимости дорогостоящей предварительной подготовки.

Исследования, проведенные на установке в «жидкой ванне» Балхашского медьзавода (БМЗ), говорят о таких перспективах использования ПЖВ как:

- обеднение шлаков (в том числе, от процессов плавки во взвешанном состоянии);
- прямое получение черновой меди и фэйнштейна (и одновременно бедных отвальных шлаков) в одной или нескольких последовательно включенных агрегатах ПЖВ;

- плавка кусковой руды без предварительного обогащения и агломерации.

Для обеспечения автогенного режима плавки сухой шихты с влажностью менее 1-2% оптимальный уровень содержания кислорода в дутье составляет в пределах 40-45%, тогда как для влажных шихт с уровнем влаги 6-8% он увеличивается до 55-65% [22]. В практике возможна обработка как мелких материалов, так и кусковой шихты, которая загружается непосредственно в расплавленный слой. Раздельное вытекание шлака и штейна осуществляется через нижнюю часть ванны с помощью сифонов, что способствует контролю и оптимизации технологического процесса [23].

Ключевым отличием плавки в жидкой ванне, в отличие от иных известных методов, является локализация процессов плавления и окисления сульфидных соединений в шлаке, а не в штейне. Кроме того, в таком процессе движению шлака характерна вертикальная ось, и он перемещается сверху вниз, тогда как во всех традиционных процессах - горизонтально [24].

Горизонталь осей фурмита, расплав делится на две зоны: верхнюю надфурменную, которая является барботируемой, и нижнюю подфурменную, в которой расплав сохраняет относительно спокойное состояние. В надфурменной области осуществляется функция плавления, растворения тугоплавких компонентов шихты, а также окисление сульфидных соединений и укрупнение мелких сульфидных частиц. Крупные капли сульфидов быстро оседают в слое шлака, многократно омывающегося в процессе движения сверху вниз по слою. Постоянное внедрение в процесс позволяет достичь динамического равновесия, при котором количество мелких сульфидных частиц, укрупнение и отделение их от шлака балансируют друг с другом [22].

Постоянство содержания сульфидов (капель) в шлаке достигается за счет установления равновесия между процессами поступления частиц при загрузке, их укрупнения и отделения от расплава. В результате в шлако-штейновой эмульсии, доминирующей в надфурменной зоне, содержится около 5–10% сульфидных капель от общего объема расплава [23].

Окисление сульфидных компонентов, являющееся очень быстрым по своей природе, как правило, не ограничивает максимально возможную производительность оборудования. В промышленном производстве рекомендуется не только избегать повышения скорости окисления, но и сознательно замедлять эти процессы, поскольку чрезмерное ускорение, например, при продувке кислородом жидких сульфидов, может привести к чрезмерному росту температуры в зоне фурм, что негативно сказывается на стабильности и безопасности процесса [24].

Процесс окисления сульфидов в шлако-штейновой эмульсии включает сложный многоступенчатый механизм, состоящий из последовательных стадий: окисления капек штейна, растворенных в шлаке сульфидных соединений, окисления FeO в шлаке до магнетита, а также окисления сульфидов магнетитом. В результате шлак также выступает в роли переносчика кислорода. Наиболее важной является стадия окисления сульфидных компонент, растворенных в шлаке. Особенностью этого механизма является то, что окисление не

сопровождается образованием первичных железистых шлаков или осаждением мелких сульфидных частиц. Образующиеся на поверхности сульфидных капель оксиды немедленно растворяются в окончательном составе шлака. Отсутствие условий для формирования значительных количеств мелкой сульфидной взвеси способствует получению более бедных и легче удаляемых шлаков, что является важным достоинством технологии плавки в жидкой ванне [25].

Высокая степень использования кислорода обеспечивает эффективное управление составом штейна и соотношением объемов подаваемого кислорода и поступающих за зацикленный период концентратов. В результате состав штейна может регулироваться в широком диапазоне, с возможностью получения как белого мата, так и черновой меди. Следует учитывать, что потери меди с шлаком резко увеличиваются при содержании металла в штейне, превышающем 60%. Поэтому, при работе на штейн, если в технологическом процессе не предусмотрено специально организованное обеднение шлаков, увеличение содержания меди в штейне выше 50-55% нецелесообразно. Для получения белого мата или черновой меди обязательно должна включаться операция по обеднению шлаков [25].

Растворение тугоплавких компонентов шихты является относительно медленным процессом, однако интенсивный барботаж ванны существенно ускоряет растворение кварца и пустотных пород, позволяя использовать крупные флюсы. Промышленные испытания показали, что при крупности кварца около 50 мм скорость его растворения не влияет на производственную мощность печи, вплоть до удельного расхода топлива порядка 80 т/(м²·сут). Высокая скорость растворения тугоплавких компонентов является важной характеристикой плавки в жидкой фазе [26].

Минимальный уровень содержания магнетита в шлаках является обязательным условием оптимального протекания плавильного процесса. Повышение содержания магнетита, как было отмечено, вызывает рост раствора меди в шлаке, а также приводит к снижению межфазного натяжения на границе разделов штейна и шлака, что благоприятствует улучшению условий разделения и эффективности плавки [26].

1.3.2 Характеристика технологического комплекса плавки Ванюкова как объекта управления

Объект управления – сложный технологический комплекс плавки Ванюкова. Технологический комплекс плавки медных концентратов в печи Ванюкова (ТК ПВ) включает следующие переделы и агрегаты: шихтоподготовка (штабельный шихтарник), собственно печь Ванюкова с конвейерными линиями, бункерами и питателями для загрузки сырья, и «сифонами» для выпуска продуктов плавки, электроотстойник для шлака, котел-утилизатор, газоходы для отвода отходящих серосодержащих газов и подачи их на сернокислотное производство. Штейн поступает в конвертерное отделение для получения черновой меди, а шлак после электроотстойника направляется в отвал.

Для обеспечения непрерывности технологического процесса шихта формируется заранее на весь цикл кампании на основе расчетов режимов плавки и данных о составе перерабатываемых материалов. По мере введения в расплав шихта подвергается нагреву, происходит её плавление, а высшие сульфиды, входящие в состав шихты, диссоциируют, образуя основные сульфидные соединения и свободную серу. Продукты диссоциации взаимодействуют с кислородом дутья, распутывая расплав, что ведет к образованию штейна, шлака и газа, насыщенного сернистым ангидридом. В процессе снизу вверх происходит постепенное расслаивание штейн-шлаковой эмульсии: штейн формирует сплошную донную фазу, тогда как шлак через сифон поступает в зону восстановления, а далее, посредством второго сифонного отверстия, направляется в шлакоблочный электроотстойник. Время от времени, по мере накопления, штейн удаляется из печи в ковш и разливается в изложницы, после предварительного взвешивания [27]. Технологическая схема комплекса плавки Ванюкова приведена на рисунке 1.3.

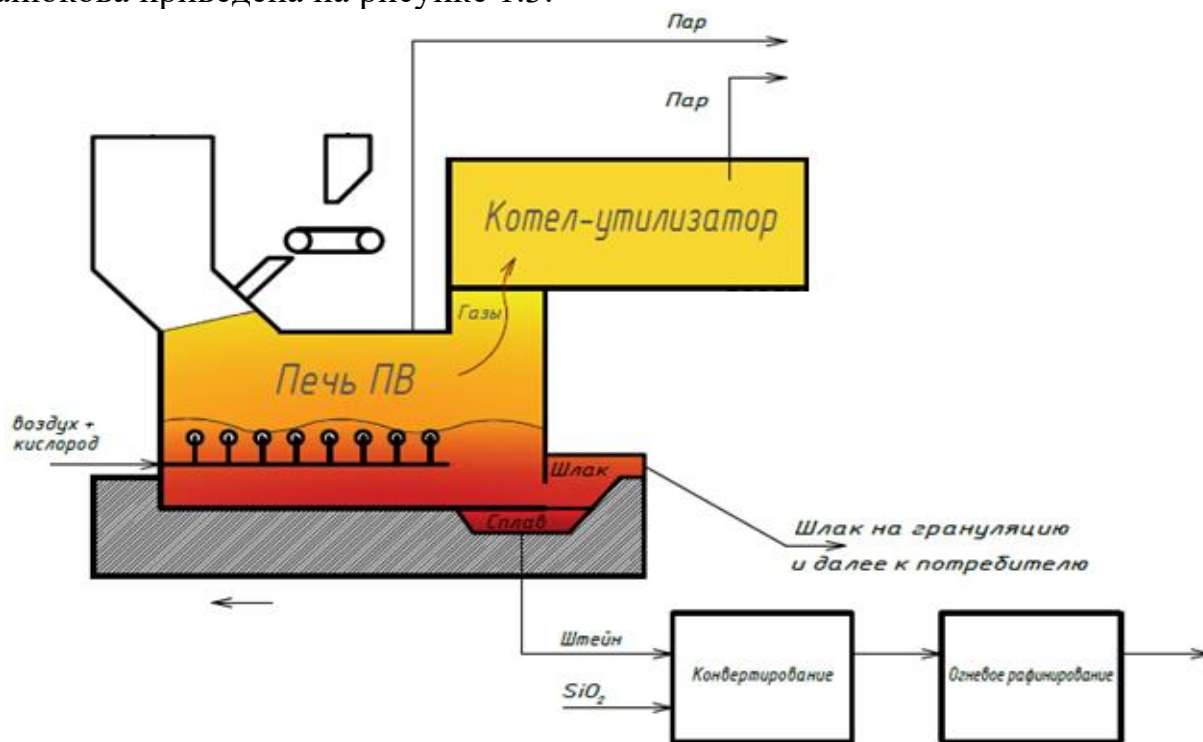


Рисунок 1.3 – Технологическая схема сложного комплекса плавки Ванюкова

Шлак, отобранный из электроотстойника, далее передается в ковш и посредством заливки осуществляется в изложницы. После затвердевания полученные плавильные продукты выводятся из производственного цеха для дальнейшей обработки. Восстановительная зона, конструктивно аналогичная плавильной, предназначена для проведения исследований режимов переработки руд, содержащих цинк и свинец, а в иных случаях функционирует в качестве поточной емкости. Газовые выбросы из каждой зоны направляются по газопроводам в систему, состоящую из циклонного фильтра, скруббера, камер

дожигания СО и охлаждения. Далее газы либо поступают в дымовую трубу, либо направляются в установку для получения элементарной серы [27].

Анализ характеристик технологического процесса переработки материалов в печи Ванюкова на Балхашском медеплавильном заводе позволяет определить, что объект управления представляет собой весьма сложную систему со множеством взаимосвязанных параметров. Среди ключевых особенностей печи Ванюкова можно выделить [27]:

- низкую инерционность объекта по каналам: дутье, температура расплава и отходящих газов;
- относительно большую инерционность по другим каналам: состав входных материалов – штейна и шлака;
- принадлежность объекта к классу непрерывных технологических процессов, характеризующихся неразрывной подачей шихты и дутья, а также непрерывным осуществлением таких процессов, как нагрев, плавление, окисление и восстановление материалов, а также массо- и теплообмен;
- постоянное поступление шлака и периодическое извлечение штейна, а также непрерывный отвод отходящих газов;
- многомерность технологического процесса, обусловленная наличием большого числа входных и выходных переменных;
- нестационарность параметров процесса, возникающая вследствие флуктуаций входных переменных, в том числе в результате недостаточной усредненности шихты
- частичная неполнота информации, выражающаяся в наличии периодически контролируемых параметров, задержках на объекте и в измерительных каналах, а также существенных помехах при сборе данных;
- узкий диапазон рабочих температур расплава в зоне плавления;
- разнообразие видов сырья, перерабатываемого на установке ПВ, что ведет к существенным различиям в характере протекания физико-химических процессов.

Современное крупное химическое производство состоит из большого числа разнотипных участков производства, связанных между собой технологической схемой. Характер этих связей может быть весьма различными: продукты и полупродукты, вырабатываемые в одних участках, поступают в следующие по ходу процесса: тепло, выделяемое на одном участке производства, утилизируется на другом; сырье и энергия распределяются между различными потребителями [27].

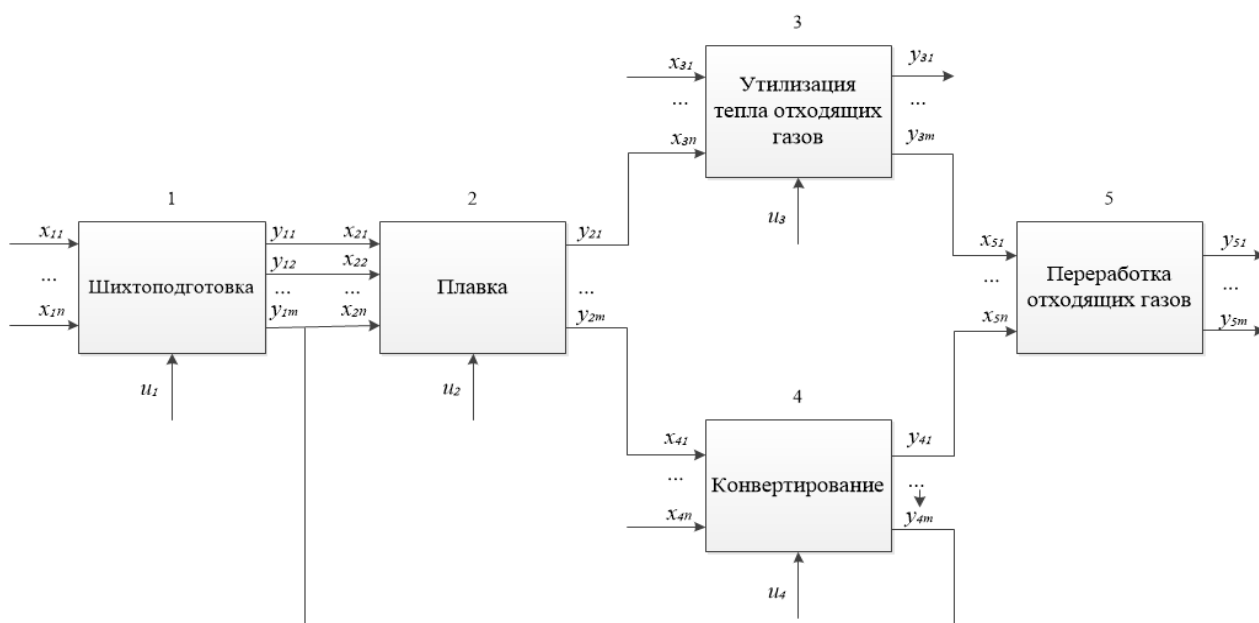
Задача управления таким технологическим комплексом состоит не только в том, чтобы поддерживать наиболее эффективный режим в каждом участке (аппарате) комплекса в отдельности, ну и в том, чтобы установить между элементами технологической схемы связи, обеспечивающие оптимальную работу всего производства или комплекса в целом [27].

Практически решение всей комплексной задачи управления крупным производством связано с большими трудностями, причиной которых является высокая размерность исходной задачи. Поэтому обычно общая

задача управления разбивается на несколько подзадач, при этом создается так называемая иерархическая система управления. Для разбиения задачи управления комплекса в целом используются методы декомпозиции [27].

Разработка системы управления сложным разветвленным технологическим комплексом состоит из двух основных этапов: предварительного исследования объекта и синтеза системы управления. В свою очередь, предварительное исследование объекта состоит из нескольких стадий. Сначала производится анализ структуры технологического комплекса. Затем строится модель комплекса, включающая в себя модели структурных элементов комплекса, модели связей между элементами и систему ограничений. Следующая стадия исследования – выбор критерия оптимизации [27].

Рассмотрим разветвленный химико-технологический комплекс плавки Ванюкова (рисунок 1.4). Прямоугольники изображают отдельные участки или группы участков, линии – материальные или энергетические потоки, входящие и выходящие из этих участков. Участки или группы участков, рассматриваемую как единое целое, как структурную единицу будем называть технологическим звеном. Потоки, соединяющие отдельные звенья, назовем связями. Поток, входящий в звено, является его входом, выходящий – выходом. Одна и та же связь может быть входом одного и выходом другого звена [27].



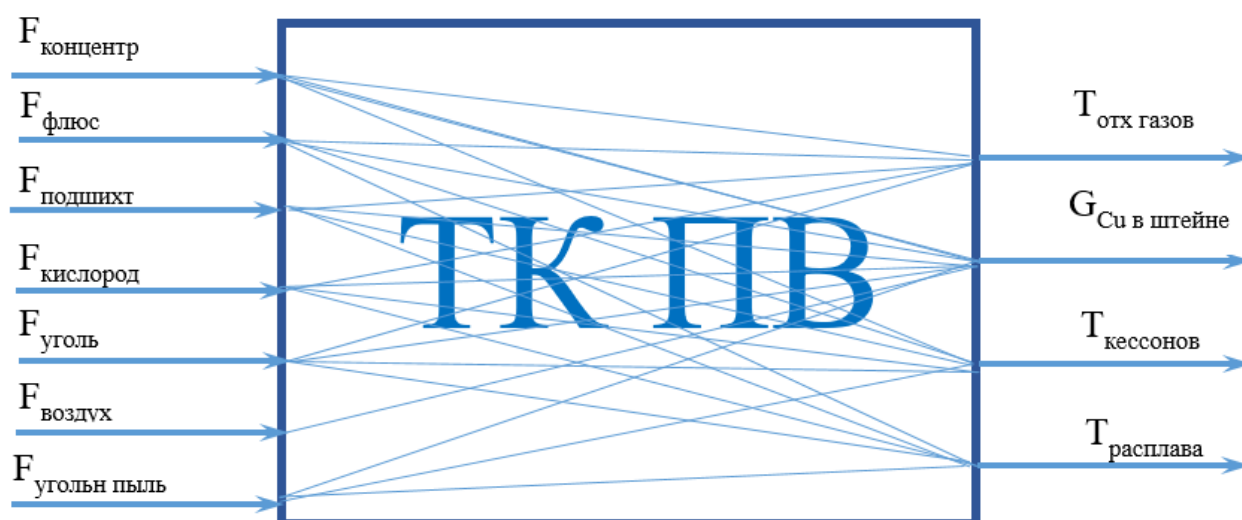
1, 2, 3, 4, 5 – технологические участки (звенья) производства (1 – шихтарник, 2 – печь Ванюкова, 3 – котел-утилизатор, 4 – конвертерное отделение, 5 – серно-кислотный цех, $x_{11} \dots x_{ij}$ – входные потоки, $y_{11} \dots y_{ij}$ – выходные потоки, $u_1 \dots u_j$ – управляющие воздействия

Рисунок 1.4 – Структурная схема технологического комплекса плавки Ванюкова

Автоматизированная система управления технологическими процессами (АСУ ТП) ТК ПВ на Балхашском медеплавильном заводе (БМЗ) разрабатывалась

и внедрялась одновременно со строительством и пуском в эксплуатацию первого производственного комплекса ПВ в конце 80-х годов прошлого столетия. Система была реализована на современных (в то время) технических средствах автоматизации и управляющих ЭВМ третьего поколения (СМ-2М и ТВСО). Затем эта система была тиражирована для второго комплекса ПВ. В настоящее время на БМЗ функционирует АСУ ТП металлургического комплекса ПВ на базе современной микропроцессорной техники, с традиционной трехуровневой структурой. Нижний («полевой») уровень включает различные контрольно-измерительные приборы и запорно-регулирующую арматуру. Средний технологический уровень реализован, как безщитовая система контроля и управления. Верхний (операторский) уровень реализован на базе SCADA-системы. Управление процессом ПВ осуществляется оператором (мастером смены) в соответствии с технологической инструкцией на основе опыта, интуиции и субъективного анализа текущих показаний контрольно-измерительных приборов (температуры, расходы, давления, разрежения и прочие переменные, в различных точках по агрегатам и материальным потокам, положение исполнительных механизмов и запорной аппаратуры), результатов химических анализов, поступающих со значительным запаздыванием, а также данных визуальных наблюдений обслуживающего персонала (уровень расплава, состояние поточно-транспортной системы, бункеров, трубопроводов, газоходов и другого оборудования). Разнообразие возникающих производственных ситуаций, различная квалификация персонала, сложность ТК ПВ, относящегося к классу стохастических, многомерных, нестационарных объектов, обуславливают невозможность, в условиях существующей системы автоматизации, качественного управления комплексом, что приводит к отклонению показателей процессов от заданных, сбоям в работе оборудования, непроизводительным остановкам и потерям, а также возникновению аварийных ситуаций [27-28].

На рисунке 1.5 представлен объект управления с перечнем входных и выходных переменных, где наиболее важными параметрами являются – входные: расход кислорода в дутье на одну тонну шихты, расход концентрата, расход угля, расход воздуха, расход угольной пыли, расход подшихтовки; выходные: температура отходящих газов, содержание серы в шихте, содержание меди в штейне, температура кессонов, температура плавления.



Входными переменные

$F_{\text{кислород}}$ - расход кислорода в дутье на одну тонну шихты;
 $F_{\text{концентр}}$ - расход концентрата;
 $F_{\text{уголь}}$ - расход угля;
 $F_{\text{воздух}}$ - расход воздуха;
 $F_{\text{угольн пыль}}$ - расход угольной пыли
 $F_{\text{подшихт}}$ - расход подшихтовки

Выходные (управляющие) переменные:

T – температура отходящих газов;
 G_S – содержание в шихте серы;
 G_{Cu} – содержание меди в штейне;
 T_k – температура кессонов;
 T_p – температура расплава.

Рисунок 1.5 - Перечень входных и выходных переменных объекта управления

Непрерывный характер производства и технологические ограничения на режимы работы оборудования предъявляют жесткие требования к системе управления комплексом в части согласования нагрузок смежных переделов и обеспечения эффективного функционирования отдельных процессов и комплекса в целом.

1.3.3 Анализ современного состояния автоматизации процесса в печи Ванюкова

В настоящее время управление технологическим процессом плавки на Балхашском медеплавильном заводе осуществляется оператором или мастером смены, основываясь преимущественно на профессиональном опыте и субъективной оценке данных, полученных с контрольно-измерительных приборов (КИП) [28]. Область мониторинга включает параметры давления и расходов в системах воздушного, кислородного и газоснабжения, а также параметры охлаждающих агентов и другие показатели, отображаемые визуально – уровень и температура расплава, состояние системы загрузки и иные признаки технологического процесса. Важным источником информации выступают результаты химических анализов, однако их получение связано с существенной задержкой, что усложняет оперативное управление. Кроме того, используются

дополнительные сведения от обслуживающего персонала о состоянии отдельных компонентов процесса, а также предварительные расчеты материального и теплового балансов, которые в совокупности формируют основу для принятия управленческих решений [29].

На объекте реализованы системы автоматического контроля отдельных переменных, в частности, температуры на отстойнике; расхода раствора и газа в газоходной системе, в районах скруббера и иных точках газохода; давления отходящих газов из печи в различных её сегментах; влажности загружаемых материалов; концентрации кислорода, подаваемого с дутьем; а также концентрации SO_2 на выходе из печи. Системы автоматического регулирования также предназначены для стабилизации ключевых режимных параметров, таких как разряжение в печи, расход отходящих газов в различных узлах газоходной сети, а также объемы кислорода и шихты, подаваемых в технологический процесс [28, 29].

Следует подчеркнуть, что на сегодняшний день ни одна из установок плавки на Балхашском медеплавильном заводе не оснащена системой оптимального управления технологическим процессом. Это обусловлено, главным образом, отсутствием достаточно точных и полноценных математических моделей, позволяющих описать динамику и особенности данного сложного процесса управления [29].

Во второй половине XX века в мировой цветной металлургии получили широкое распространение технологические процессы плавки шихты, использующие теплотворную способность сульфидного сырья, и названные, в связи с этим, «автогенными». Основным преимуществом таких процессов является значительное снижение затрат топлива в сравнении существовавшими процессами отражательной и шахтной плавки. Были разработаны и реализованы в промышленности различные технологические схемы и аппаратное оформление автогенных процессов – кислородно-взвешенная плавка (КВП), кислородно-факельная плавка (КФП), циклонная плавка, плавка с погружной фурмой и др. Коллективом советских ученых под руководством профессора Московского института стали и сплавов А.В.Ванюкова был разработан процесс плавки сырья в расплаве - «жидкой ванне» (ПЖВ), которому позже было присвоено наименование «плавка Ванюкова», и, соответственно, агрегату - «печь Ванюкова» (ПВ). В исследовании и внедрении процесса принимали участие специалисты Московского института стали и сплавов, Института металлургии и обогащения АН Казахской ССР, институтов Гинцветмет, Гипроцветмет, Гипроникель и др. [29, 30].

В настоящее время промышленные печи Ванюкова для плавки в «жидкой ванне» устойчиво работают на Балхашском медеплавильном заводе Корпорации «Казахмыс» в Казахстане, а также на предприятиях ОАО «ГМК «Норильский никель» и Средне-Уральском медеплавильном заводе (СУМЗ) в России. Данная технология имеет большие перспективы в цветной и черной металлургии [30]. Принципиальными преимуществами ПВ перед другими автогенными способами являются: непрерывность процесса, возможность плавки сырой (до 8 % влаги) и

кусовой шихты, высокая удельная производительность, низкий пылевынос, высокая эффективность физико-химических процессов в расплаве, низкое содержание ценных компонентов в шлаке, возможность получения «богатых» штейна и отходящих газов (по диоксиду серы), утилизация выделяющегося тепла и пр. [30].

1.4 Постановка задач исследования

Целью данной диссертации является синтез эффективной гибридной системы управления медеплавильным производством, позволяющий перейти на высокоуровневый критерий оптимизации, учитывающий задания для основных процессов.

В соответствии с поставленной целью определены следующие научные задачи, которые необходимо решить в настоящей работе:

1. Оценка технического состояния технологического комплекса медеплавильного производства и формулирование концепции создания гибридной системы управления на основе аналитического обзора.

2. Теоретическое обоснование основы синтеза гибридной системы управления плавки Ванюкова (ПВ) как сложного технологического комплекса.

3. Разработка структуры математической модели гибридной системы управления технологическим комплексом медеплавильного производства, описывающей процессы, протекающие в надфурменной зоне печи ПВ и зоне расслоения продуктов плавки (зона отстоя).

4. Синтез моделей и алгоритмов гибридной системы управления на основе анализа и обработки больших данных технологического комплекса медеплавильного производства.

5. Испытание прототипа гибридной системы управления и исследование на чувствительность, устойчивость, однозначность и оценка ее адекватности.

1.5 Заключение по разделу

Таким образом, медеплавильное производство является важной отраслью в странах СНГ, где активно развиваются новые технологии и строятся новые заводы с высокой производительностью.

Применение гибридных систем управления становится все более актуальным в сложных технологических комплексах, где традиционные методы моделирования не всегда эффективны из-за нечеткой или неполной информации об объекте. Важным аспектом управления такими комплексами является установление оптимальных связей между элементами технологической схемы для обеспечения эффективной работы всего производства.

Для успешного управления крупными производствами необходимо использовать иерархическую систему управления, разбивая общую задачу на подзадачи и применяя методы декомпозиции для снижения размерности исходной задачи.

В данном разделе приводятся следующие:

1. Дана общая характеристика о техническом состоянии технологического комплекса медеплавильного производства.

2. Приведены общие сведения и понятие о гибридных системах управления и описаны достоинства и недостатки интеллектуальных технологий при создании гибридных систем управления металлургическими процессами.

3. Приведено описание технологического процесса плавки Ванюкова и дана характеристика процесса как объекта управления.

4. Приведена технологическая и структурная схемы комплекса плавки Ванюкова и сделан анализ современного состояния автоматизации данного процесса, а также сформулированы цель и основные задачи исследований.

Результаты, изложенные в данном разделе, были опубликованы в научных статьях: [48], [49].

2 РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ СИНТЕЗА ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПЛАВКИ ВАНЮКОВА КАК СЛОЖНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

2.1 Разработка концепции синтеза гибридной систем управления

Анализ существующих исследований в области теории и практики искусственного интеллекта, рассмотренный в пунктах 1.1-1.2, демонстрирует, что на сегодняшний день разработаны сравнительно эффективные методы и технологии ИИ, которые нашли широкое применение в различных сферах, включая системы автоматического управления. Однако большинство исследовательских работ ориентированы на создание и внедрение локальных систем управления, предназначенных преимущественно для стабилизации отдельных переменных технологических процессов [31]. В литературных источниках практически отсутствуют примеры реализации интеллектуальных технологий (ИТ) для создания систем оптимального управления сложными технологическими системами. Как уже было отмечено ранее, существующие традиционные методы построения математических моделей не позволяют в полной мере реализовать практическое внедрение полнофункциональных систем автоматического управления, что в особенности проявляется в условиях ограниченных ресурсов и специфики региона, например, в Казахстане [32].

Исходя из этого, в данной работе поставлена цель – развитие и усовершенствование информационных технологий с учетом специфики управления технологическими процессами. В качестве подхода предложена концепция создания интеллектуальных и гибридных систем управления, а также разработаны средства для интеграции моделей управления, реализованных в среде Simulink, в промышленные контроллеры. Это позволяет расширить возможности автоматизации и повысить эффективность процессов управления посредством современных технологий искусственного интеллекта [31], [32].

Кафедра автоматизации и управления Казахского национального исследовательского технического университета им. К.И. Сатпаева активно занимается вопросами разработки и исследования гибридных и интеллектуальных систем автоматизации различных технологических процессов. Анализ осуществленных на кафедре научных работ, а также обзор соответствующей литературы (см. пункты 1.1-1.2), свидетельствует о возможности применения информационных технологий (ИТ) не только для моделирования технологического процесса, но и для непосредственного синтеза алгоритмов оптимального управления им. Такой подход позволяет разрабатывать управляющие алгоритмы параллельно с формированием модели, в отличие от традиционной схемы, включающей стадии: создание структурной модели процесса, проведение экспериментальных исследований, идентификация модели, постановка задачи оптимизации, выбор метода оптимизации, разработка соответствующего алгоритма управления. Традиционный путь, как правило, занимает длительный промежуток времени – порой несколько лет, требует значительных материальных затрат и не всегда приводит к ожидаемым результатам [33].

Использование методов искусственного интеллекта (ИИ) позволяет решать подобные задачи значительно быстрее и с высокой степенью эффективности. Основная идея заключается в использовании знаний, опыта и интуиции опытных специалистов в предметной области, являющихся носителями так называемого эффекта «готовых знаний» [34]. В отличие от этого, создание математической модели, являющейся ключевым компонентом системы, подразумевает извлечение новых знаний на основе теоретических исследований и требует значительных временных и трудовых затрат на проведение экспериментальных работ и идентификацию модели.

Более того, опытные операторы и технологи за годы работы приобретают навыки ведения технологического процесса в оптимальных режимах при различных начальных условиях, что зачастую позволяет им успешно управлять процессом без помощи автоматизированных систем [34]. Передача профессиональных знаний и опыта специалистов в базу данных интеллектуальной системы существенно облегчает разработку и внедрение таких систем, а также исключает влияние человеческого фактора. При этом можно устранить такие человеческие свойства, как утомляемость, замедленная реакция, психологическая неустойчивость, сонливость при монотонной работе, а также недостаточный опыт молодых операторов, что способствует повышению стабильности и эффективности управления.

Основываясь на указанной концепции – замене математической модели технологического процесса моделью системы управления – и интегрируя существующие методы ИИ, предлагается разработка концепции синтеза гибридной системы автоматизации для сложных технологических комплексов, в частности, системы Ванюкова (см. рис. 2.1).

Концепция синтеза гибридной системы управления технологическим комплексом медеплавильного производства, взятого на примере процесса плавки

Ванюкова, предполагает создание интегрированной системы, которая сочетает в себе элементы автоматизированного управления и элементы искусственного интеллекта.

Цель такой системы – повышение эффективности, надежности и оптимизации процесса плавления меди.



Рисунок 2.1 – Концепция синтеза гибридной системы управления технологическим комплексом

Синтез гибридной системы управления может включать следующие компоненты:

1. Сенсоры и измерительные устройства для сбора данных в реальном времени о температуре, давлении, химическом составе и других параметрах процесса.

2. Автоматизированные системы управления (АСУ), которые контролируют основные механизмы и оборудование, такие как печи, насосы и транспортные системы.

3. Системы мониторинга и диагностики искусственного интеллекта, включающие машинное обучение и алгоритмы оптимизации для анализа данных, прогнозирования и принятия решений. Эти системы непрерывно отслеживают параметры процесса и состояние оборудования, чтобы предотвращать неполадки и незапланированные остановки. Эти системы могут использовать датчики для сбора данных в реальном времени и применять методы машинного обучения для прогнозирования потенциальных проблем, что позволяет осуществлять своевременное техническое обслуживание и ремонт.

4. Интеллектуальные алгоритмы управления, которые адаптируются к изменениям в процессе и могут оптимизировать параметры плавки в реальном времени для улучшения качества продукции и энергоэффективности.

5. Интерфейсы человеко-машинного взаимодействия (НМИ), позволяющие операторам легко взаимодействовать с системой, получать необходимую

информацию о состоянии процесса и вмешиваться в управление при необходимости.

6. Системы поддержки принятия решений, которые анализируют большие объемы данных и предоставляют рекомендации операторам или автоматически корректируют процесс в соответствии с заданными целями.

7. Модули связи и интеграции данных, обеспечивающие обмен информацией между различными компонентами системы и возможность интеграции с другими корпоративными системами, такими как ERP (Enterprise Resource Planning) или MES (Manufacturing Execution Systems).

Синтез такой гибридной системы управления требует междисциплинарного подхода, включающего знания в области металлургии, автоматизации, информационных технологий и искусственного интеллекта. Важным аспектом является также обеспечение безопасности процесса и защиты данных.

Разработка и внедрение гибридной системы управления позволит повысить эффективность процесса плавки Ванюкова, снизить расходы.

2.2 Описание программно-технических средств для гибридной системы управления в промышленных условиях

Для реализации сформулированных нечетких правил, разработанных в среде FuzzyLogicToolbox пакета MATLAB, их необходимо загрузить в программируемый логический контроллер (ПЛК). Этот процесс включает интеграцию контроллера с средой моделирования Simulink, в которую включается система нечетких правил, созданная в указанной среде [35–37].

Для этого используется современный контроллер HC900, который обеспечивает реализацию контурного и логического управления и обладает модульной структурой, позволяющей удовлетворить требования по управлению и сбору данных для широкого спектра технологического оборудования. Контроллер HC900 обеспечивает высокое качество управления на основе замкнутого регулятора типа ПИД (пропорционально-интегрально-дифференциального) и обеспечивает более стабильную обработку аналоговых сигналов по сравнению с большинством логических контроллеров, при этом не ухудшая эффективность выполнения логических операций. Логические блоки могут функционировать параллельно с аналоговыми компонентами, что позволяет полностью интегрировать их в комбинированную стратегию управления, сочетающую аналоговые и логические переменные, для обеспечения устойчивого функционирования системы [35].

Интеграция осуществляется с использованием технологии OPC (OLE for Process Control), которая является стандартом для обмена данными в системах автоматизации [36]. Эта технология предназначена для обеспечения универсального и надежного механизма связи между датчиками, исполнительными механизмами, контроллерами, системами связи с объектом и системами автоматического диспетчерского управления, а также системами

хранения данных. Производители оборудования пользуются спецификацией OPC для разработки программного обеспечения, обеспечивающего единый и универсальный доступ к данным и их передачу между приложениями различных фирм.

На сегодняшний день технология OPC считается практически стандартной для построения автоматизированных систем. OPC-сервер выступает как программная платформа, обеспечивающая унифицированный режим доступа к данным для различных программных решений, таких как системы автоматизированного проектирования (САПР) или иные средства автоматизации [36].

В рамках выбранной методики применяется спецификация OPC Data Access (OPC DA), которая является наиболее распространенной и востребованной для обмена данными в реальном времени с ПЛК и другими устройствами автоматизации. Использование OPC способствует повышению адаптируемости системы к различным сетям, а также обеспечивает её масштабируемость и возможность дальнейшего расширения. Помимо этого, поддержка стандарта OPC рядом с производителями оборудования обеспечивает возможность объединения компонентов в единую интегрированную систему автоматизации [37].

Для реализации описанного подхода необходимо на персональном компьютере установить следующий программный комплект: MATLAB с дополнением Simulink, Toolbox OPC, программное обеспечение HybridControlDesigner для конфигурации контроллеров, а также OPC-сервер.

Программное обеспечение HybridControlDesigner используется для настройки гибридного контроллера HC900 и операторского интерфейса и функционирует под управлением операционной системы Windows. В процессе конфигурирования применяется графический интерфейс с использованием символов и линий соединения, позволяющий создавать необходимые алгоритмы управления. Меню программы предусматривает выбор дисплеев операторского интерфейса, настройку доступа к платформам и функции управления. После завершения конфигурации файл загружается в систему управления через специализированный коммуникационный порт контроллера [35].

Чтение и запись данных осуществляется с периодом, равным шагу моделирования. Для корректного функционирования модели необходимо установить время шага равным значению `scrate`, заданному при конфигурировании OPC-сервера. В случае работы с OPC-сервером моделирование проходит в режиме реального времени.

Далее происходит передача данных из среды Simulink в контроллер. Обработка нечетких правил, импортированных из Simulink, осуществляется с помощью стандартных модулей нечеткого управления, реализованных в контроллере HC900, что обеспечивает своевременное и точное управление технологической системой [35–37].

2.3 Существующая практика управления режимами в ТК ПВ на Балхашском медеплавильном заводе

Одним из ключевых аспектов технологического процесса Ванюкова является его непрерывность, которая одновременно представляет собой основное требование к организации работы системы [38]. Необходимо обеспечить постоянную подачу шихтовых материалов и газов дутья с высоким уровнем стабильности, а также непрерывный вывод продуктов плавки из печи [39].

При загрузке шихты оператор обязан контролировать непрерывность подачи материала и состояние загрузочных каналов для предотвращения перебоев. Заполнение шихтовых бункеров осуществляется по требованию плавильщика не позднее чем за час до их полной выработки. Все отклонения в режиме загрузки должны своевременно сообщаться сменному мастеру или оператору производственного участка. В свою очередь, оператор, регулирующий процесс, осуществляет контроль за работой системы подачи шихты с помощью соответствующих контрольно-измерительных приборов, расположенных на пульте управления [40].

Остановка подачи шихты ведет к переокислению расплава, формированию пенной поверхности и возможному выбросу расплавленных материалов из печи. В случае остановки загрузочного тракта, рекомендуется немедленно переводить печь в режим приточности или дренажной работы. При остановке одного из транспортных средств подачи необходимо закрыть рабочие фурмы в области загрузки и перераспределить шихту и дутья в другие зоны печи. Важно учитывать, что переокисленное состояние ванны расплава может возникнуть и при непрерывной подаче шихты вследствие изменения технологических режимов. В таких случаях, для восстановления нормальных условий работы, рекомендуется усиливать подачу углеродных материалов и шихты, чтобы вернуть печь к допустимым режимам [40].

По мере достижения рабочего режима плавки, оператор должен поддерживать параметры процесса в соответствии с показаниями контрольной аппаратуры и под руководством мастера – вносить необходимые корректировки режимов работы [41]. Для обеспечения непрерывной и стабильной эксплуатации процессов *varme*, необходимо строго соблюдать технологическую дисциплину при эксплуатации не только основного, но и вспомогательного оборудования [41].

Одним из важнейших параметров процесса плавки является температура расплава, которая напрямую влияет на потери меди со шлаком, стабильность работы печи и функционирование её узлов, таких как перетоки, сифоны, жаровые фурмы и переточные желоба [41]. Недопустимо снижение температуры плавки ниже 1200 °С, поскольку это ведет к заживанию фурм, ухудшению усвоения кислорода, замедлению взаимодействующих процессов и возможной диссоциации шлака с штейном, а также к образованию слоя застывших масс и увеличению потерь меди. Максимальная рекомендуемая температура плавки не

должна превышать 1300 °С, поскольку чрезмерный перегрев может привести к течи расплава через стенки и соединения печи [41].

Контроль температуры ванны осуществляется визуальными средствами или с помощью оптических пирометров. В качестве дополнительного метода для оценки температуры используется мониторинг теплового содержания охлаждающей воды, циркулирующей вокруг печи. При постоянном расходе охлаждающей жидкости изменение температуры фиксируется по разнице температур на сливных и напорных линиях (ΔT). Для поддержания оптимальных условий плавки и предотвращения образования подовых слоев и потерь меди, температура должна находиться в диапазоне около 1300 °С, что соответствует $\Delta T = 12 \pm 3$ °С при расходе воды порядка 900 м³/час. В случае изменения ΔT необходимо предпринимать меры по разогреву или охлаждению расплава в зависимости от направления изменения температуры [41].

Использование данных методов и контроль параметров позволяют обеспечить стабильность и эффективность работы технологического процесса, что является важным условием достижения установленных производственных целей и обеспечения качества продукции.

Регулирование температуры ванны расплава в процессе мартеновского пламени осуществляется за счет изменения концентрации кислорода в обогащении дутья, а также через корректировку соотношения между дутьем, загрузкой шихты и введением угля или клинкера. Контроль за режимами плавки осуществляет оператор, который следит за поддержанием требуемых параметров процесса. Особую роль в обеспечении оптимальных условий плавки играют составы продуктов плавки, их точное регулирование является критически важным для стабильной работы печи [42].

Для поддержания технологической стабильности и снижения медных потерь с отходящими шлаками необходимо проводить регулярные замеры уровня шихты внутри печи не менее двух раз за смену. Параллельно с этим, для уменьшения потерь меди с отвальными шлаками, производится регулярный выпуск отстоявшегося штейна из шлакового миксера [42].

Обязательной частью технологии является переработка жидких конвертерных шлаков. Заливка шлака осуществляется в целях его обезмежевания и производится с помощью мостовых кранов, которые наполняют ковши емкостью 6 м³ по стационарным желобам, установленным в центре торцевой стены печи Ванюкова. Распределение конвертерного шлака по различным печам происходит равномерно, при этом объем загрузки шлака зависит от текущей температуры, состояния и состава шлаковой ванны; по мере необходимости он может быть увеличен или уменьшен.

В шлаковую ванну, расположенную в районе штейнового сифонного устройства, конвертерный шлак поступает с целью его движения к шлаковому сифонному оборудованию. В процессе этого шлак восстанавливается и обедняется под действием капель промывающего штейн шлака. Обработка пяти-шести ковшей конвертерного шлака за смену практически не оказывает влияния на содержание меди и магнетита в конечных шлаках производства [43].

Увеличение объема шлакообразных материалов требует повышения температуры и корректировки состава шлака по кремнезему для предотвращения увеличения потерь меди и образования промежуточных слоев [43]. Помимо жидкого конвертерного шлака, в технологическом процессе также перерабатываются твердые оборотные материалы и клинкер цинкового производства. Для ускорения расплавления кусковых оборотных материалов, содержащих магнетит, их необходимо дробить до размеров не более 10 мм, поскольку недробленые куски могут не расплавиться полностью и накапливаться в границе штейн-шлак, что способствует образованию промежуточных слоев и нарушению режимов плавки. Высокое содержание металлического железа (около 20%) и углерода (до 30%) в клинкере цинкового производства обеспечивает его переработку при достаточно высоких температурах и интенсивном перемешивании расплава; при низких температурах расплава (ниже 1200°C) и слабом перемешивании процессы массообмена замедляются, процесс усвоения клинкера в шлак не завершается полностью, что ведет к гетерогенизации шлака и увеличению потерь меди [43].

2.4 Заключение по разделу

По результатам проделанной работы в настоящем разделе можно сделать следующие выводы:

1. Гибридная система управления плавкой Ванюкова включает в себя интерфейсы человеко-машинного взаимодействия, системы поддержки принятия решений и модули связи и интеграции данных.

2. Синтез гибридной системы управления включает компоненты: сенсоры, автоматизированные системы управления, системы мониторинга и диагностики искусственного интеллекта, интеллектуальные алгоритмы управления .

3. Разработка концепции синтеза гибридной системы управления для процесса плавки Ванюкова требует междисциплинарного подхода, включающего знания в области металлургии, автоматизации, информационных технологий и искусственного интеллекта .

4. Преимущества использования готовых знаний от опытных операторов-технологов для создания интеллектуальных систем управления и исключения человеческого фактора при управлении процессом .

5. Концепция синтеза гибридной системы управления для технологического комплекса медеплавильного производства, включая процесс плавки Ванюкова, направлена на повышение эффективности, надежности и оптимизации процесса плавления меди.

Результаты, изложенные в данном разделе, были опубликованы в научных статьях: [50], [51].

3 РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И АЛГОРИТМА ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПЛАВКОЙ ВАНЮКОВА

3.1 Математическое описание процессов, протекающих в плавке Ванюкова

Схема математической модели пирометаллургических процессов может быть представлена в виде блок-схемы, где каждый блок соответствует определенному элементу или подпроцессу в рамках общего процесса. На рисунке 3.1 представлена реализация такой схемы.

Каждый из этих блоков взаимосвязан с другими, обеспечивая полное представление о процессе пирометаллургии. В зависимости от конкретного процесса и доступных данных, математическая модель может быть дополнена дополнительными подмоделями, например, кинетическими моделями химических реакций или моделями распределения температуры внутри печи.



Рисунок 3.1 – Описание процессов, протекающих в плавке Ванюкова

Описание каждого блока представлено ниже:

1. Блок технологического режима:

- Входные потоки: шихта, воздух, кислород, угольная пыль.
- Процессы: химическое взаимодействие, плавление, восстановление.
- Выходные потоки: штейн, шлак, отходящие газы.

2. Блок теплового режима:

- Входящее тепло: от сгорания топлива, химические реакции.
- Тепловые потери: излучение, конвекция, проводимость.
- Выходящее тепло: с отходящими газами, охлаждение продуктов.

3. Блок гидро- и аэродинамики:

- Движение потоков: твердых веществ, жидкостей (расплав), газов.

- Взаимодействие потоков: смешение, распределение, турбулентность.

4. Блок материального и теплового баланса:

- Уравнения материального баланса: учитывают входные и выходные потоки всех веществ, участвующих в процессе.
- Уравнения теплового баланса: учитывают все источники тепловыделения и теплопоглощения, а также потери тепла.

В контексте оперативного планирования и управления технологическим комплексом, математическая модель предоставляет возможность прогнозирования результатов изменения технологических параметров, оптимизации расхода ресурсов и минимизации отходов производства.

Важно отметить, что построение такой модели требует тщательного сбора и анализа данных, а также применения методов математического моделирования и оптимизации. Модель должна регулярно обновляться и корректироваться на основе реальных операционных данных для обеспечения её актуальности и точности.

3.2 Математическая модель технологического комплекса

Разрабатываемая математическая модель управления процессом плавки при расчете материальных потоков шихты позволит отслеживать изменения теплового состояния плавки (по содержанию меди в штейне). Такая система достаточно хорошо может описать динамику состояния процесса как при установлении воздействий, направленных на повышение нагрева печи, так и на снижение ее нагрева.

1. В основу расчета динамических характеристик печи необходимо положить фундаментальные знания по теории и практике современных «автогенных» процессов, а также общие закономерности переходных процессов, полученные при использовании динамической модели процесса плавки.

2. Динамические характеристики печи по различным каналам воздействий существенно изменяются и зависят от свойств проплавляемого сырья, конструктивных и режимных параметров работы печи. В связи с этим статические параметры целесообразно определять по модели, а длительность переходных процессов и величины запаздывания в объекте связывать со временем оборота одного объема шихты в печи.

3. Колебательный переходный процесс в печи наблюдается в том случае, если после нанесения возмущения оно будет оказывать противоположное влияние на тепловое состояние нижней и верхней ступеней теплообмена. Величина перерегулирования при этом будет тем больше, чем существеннее по величине и по знаку это различие.

4. Наиболее предсказуемыми параметрами, влияющими на содержание меди в штейне, являются изменение штейновой нагрузки, влажности дутья, а также основности шлака.

5. Изменение концентрации кислорода в дутье и расхода природного газа нельзя использовать в качестве параметров для регулирования содержания меди в штейне. Это связано со знакопеременным характером влияния этих параметров на тепловой режим плавки. Принятие необоснованных решений по установлению параметров расхода природного газа и концентрации кислорода в дутье для регулирования содержания меди в штейне может привести к результату противоположному ожидаемому.

Математическое описание комплекса состоит из описаний отдельных участков и связей между ними.

Технологическое звено (участок) имеет несколько входов x_{ij} и выходов y_{ij} . Кроме того, на технологическое звено поступает управляющее воздействие u_i .

Система уравнений, определяющая зависимость между входами, выходами и управляющими воздействиями для i -того звена, имеющего n входов и m выходов задается в следующем общем виде:

$$F_{ik}(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}, y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{im}, u_i) = 0$$

В работе рассматриваются статические нелинейные модели звеньев. Полученная нелинейная модель имеет вид системы полиномов:

$$y_{ij} = \sum_{k=1}^n a_{ijk} x_{ik} + \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n b_{ijkl} x_{ik} x_{il} + \dots$$

Кроме описаний отдельных участков в математическую модель объекта входят уравнения связи, описывающие топологическую структуру производства. В общем случае уравнение связи имеет вид:

$$x_{ij} = y_{kl}$$

где i, k – номера участков, j, l – номера входов и выходов.

В состав математического описания производства входит также ряд неравенств, в виде ограничений, накладываемые условиями реализуемости, безопасности, внешними связями производства. В общем виде можно записать, как:

$$\psi(x_1, x_2, \dots, x_n, y_1, y_2, \dots, y_m, u_1, u_2, \dots, u_n) \leq 0$$

Совокупность математических описаний участков, топологических связей и ограничений составляет математическую модель технологического комплекса

3.2.1 Структура модели технологического режима комплекса

Традиционная структура математического описания пирометаллургических процессов содержит две основные взаимосвязанные модели – технологического режима и теплового режима. Кроме того в зависимости от назначения и целей использования моделей в различной степени описываются химическое взаимодействие и движение потоков твердых веществ, жидкостей (расплава) и газов (гидро- и аэродинамика) в печи (Приложении С).

Математическую модель процесса Ванюкова, разрабатываемую в рамках настоящего диссертационного исследования предполагается использовать для целей оперативного планирования и управления технологическим комплексом.

Поэтому предполагаемая к построению математическая модель плавки Ванюкова выбирается в классе статических моделей на основе уравнений материального и теплового баланса по основным составляющим входных и выходных потоков (железосодержащее сырье, концентрат, уголь, воздух, кислород, газ на горение, штейн, шлак, температура кессонов, отходящие газы, расплав, пыль и т.п., выделяемое и поглощаемое тепло).

Общая структура модели, описывающий процесс, где входными переменными являются величины потоков и химический состав сырья (концентрат, уголь, шихта, клинкер), обороты, дутье КВС, объемы и состав воздуха, кислорода, горючего газа и т.д. и выходные переменные работы печи: количество и состав выходных продуктов, в т.ч.:

- шихта и содержание в ней Cu, Fe, Si, Mg, S и пр.;
- штейн и содержание в нем Cu, Fe, S, Zn, P , и пр.;
- шлак и содержание в нем FeO, CaO, SiO_2, MgO и пр.;
- отходящие газы и содержание в них CO, CO_2, CH_4, N_2, O_2 и пр.;
- пыль и содержание в ней основных компонентов входных и выходных материалов;

- угар (в долях от количества компонентов во входных материалах).

Основное уравнение взаимосвязи выходных переменных модели с входными имеет вид:

$$G_k^i = \sum_j^n \beta_{j/k}^i \alpha_j^i G_j \quad (3.1)$$

где G_k^i - количество i -того компонента в k -том выходном продукте;

$\beta_{j/k}^i$ - коэффициент извлечения (перехода) i -того компонента из j -того входного материала в k -тый выходной продукт;

α_j^i - содержание i -того компонента в j -том входном потоке (материале), в долях ед.;

G_j - количество j -того входного (исходного) материала.

Общий вид уравнения 3.1 предполагает возможность учета всех входных материальных потоков, содержащих i -тый компонент (вещество), под которым может пониматься как химический элемент (например, железо Fe, углерод C и др.), так и устойчивое соединение (например, окислы кальция, кремния, магния

- CaO, SiO₂, MgO, соответственно и др.). Выбор компонентов (*i*), а также учитываемых в модели входных (*j*) и выходных (*k*) материальных потоков зависит от технологии производства и характера протекающих физико-химических процессов. При этом можно ориентироваться на металлургические расчеты материального и теплового балансов, которые, как правило, в достаточной степени отражают текущий уровень понимания (знания) технологических особенностей конкретного производства. Как правило, выбор компонента (*i*) в значительной степени зависит от соответствующего выходного продукта: для штейна - это медь, углерод, легирующие металлы; для шлака – шлакообразующие окислы; для отходящих газов и пыли – легколетучие и газообразные компоненты.

Коэффициенты извлечения, используемые в модели ($\beta_{j/k}^i$) широко применяются в металлургических расчетах. Их значение достаточно постоянно (устойчиво) для отлаженной технологии производства и требуемой точности расчетов, выполняемых с помощью математической модели. Однако, по отдельным компонентам для определения их содержания в выходных продуктах задание значений коэффициентов извлечения требует проведение дополнительных расчетов или использования других расчетных соотношений. Так содержание углерода в штейне зависит от характера окислительно-восстановительных процессов в печи (окисление или науглераживание).

При построении математической модели технологического режима должны соблюдаться требования материального баланса как по отдельным компонентам:

$$\sum_{j=1}^n \alpha_j^i G_j = \sum_{k=1}^l G_k^i,$$

так и по общему количеству входных и выходных материальных потоков:

$$\sum_{j=1}^n G_j = \sum_{k=1}^l G_k.$$

Процесс шихтоподготовки. Расчет количества и состава шихты. В отсутствии экспериментальных данных и по аналогии с металлургическим расчетом полагаем, что в качестве исходных материалов в шихте можно считать железо, медь, углерод, кремний, марганец, фосфор и сера. После проведения экспериментальных исследований на действующей печи могут быть учтены и другие компоненты сырья и продуктов протекающих в печи реакций.

Общее уравнение для определения массового количества компонентов в шихте имеет вид:

$$G_{\text{ших}}^i = \sum_{j=1}^n \beta_{j/\text{ших}}^i \alpha_j^i G_j, \beta = 1$$

где *j* – индекс исходных (входных) материальных потоков – концентратов (конц1- борнит Cu₅FeS₄; конц2-халькопирит - CuFeS₂; конц3 - халькозин - Cu₂S), флюсов (конц4 - борнит FeS₂; конц5 - кварц SiO₂; конц6 - известняк - CaCO₃; конц7 - магнезит MgCO₃)

1) Количество меди (Cu) в шихте:

$$G_{\text{ших}}^{\text{Cu}} = \sum_{j=1}^n \alpha_j^{\text{Cu}} G_j = \alpha_{\text{конц1}}^{\text{Cu}} G_{\text{конц1}} + \alpha_{\text{конц2}}^{\text{Cu}} G_{\text{конц2}} + \alpha_{\text{конц3}}^{\text{Cu}} G_{\text{конц3}} \approx \alpha_{\text{ших}}^{\text{Cu}} G_{\text{ших}}$$

Аналогично записываются уравнения для расчета количества других компонентов в шихте, переходящих в нее из соответствующих входных материальных потоков, содержащих эти компоненты.

2) Общее количество шихты:

$$G_{\text{ших}} = \sum_i G_{\text{ших}}^i + G_{\text{ших}}^{\text{неуч}}$$

3) Состав шихты, т.е. содержание отдельных компонентов (i) определяется уравнением:

$$\alpha_{\text{ших}}^i = \frac{G_{\text{ших}}^i}{G_{\text{ших}}}$$

Процесс плавки. Расчет количества и состава штейна. Общее уравнение для определения массового количества компонентов в шихте имеет вид:

$$G_{\text{шт}}^i = \sum_{j=1}^n \beta_{j/\text{шт}}^i \alpha_j^i G_j \approx \beta_{\text{вх.пот}/\text{шт}}^i \alpha_{\text{вх.пот}/\text{шт}}^i G_{\text{шт}} , \quad (3.2)$$

где j – индекс входных материальных потоков, выходящих от процесса шихтоподготовки. При расчете количества штейна должны учитываться все материалы, содержащие сумму меди, или железа во всех формах (окисленная, сульфидная и пр.) Для принятых в данной задаче условий входным медесодержащим потоком являются шихта (индекс «ших»), производственная шихта (индекс «пших»), кислород в дутье (индекс «кисл»), воздух (индекс «возд»), уголь (индекс «уг»), конвертерный шлак (индекс «кшл»), клинкер (индекс «кл»).

Теоретически, в зависимости от формы нахождения железа в каждом материале коэффициенты извлечения из каждого входного материала в выходной продукт будут разными. Практически по аналогии с металлургическим расчетом можно считать их одинаковыми и воспользоваться средним значением коэффициента извлечения меди из штейна (последний член уравнения 3.2).

1) Количество меди (Cu) в штейне

$$G_{\text{шт}}^{\text{Cu}} = \sum_{j=1}^n \beta_{j/\text{шт}}^{\text{Cu}} \alpha_j^{\text{Cu}} G_j = \beta_{\text{ших}/\text{шт}}^{\text{Cu}} \alpha_{\text{ших}}^{\text{Cu}} G_{\text{ших}} + \beta_{\text{пших}/\text{шт}}^{\text{Cu}} \alpha_{\text{пших}}^{\text{Cu}} G_{\text{пших}} + \\ + \beta_{\text{кшл}/\text{шт}}^{\text{Cu}} \alpha_{\text{кшл}}^{\text{Cu}} G_{\text{кшл}} + \beta_{\text{кл}/\text{шт}}^{\text{Cu}} \alpha_{\text{кл}}^{\text{Cu}} G_{\text{кл}}$$

Аналогично записываются уравнения для расчета количества других компонентов в штейне, переходящих в него из соответствующих входных материальных потоков, содержащих эти компоненты.

В уравнениях под индексом j понимаются входные материальные потоки, содержащие соответствующие компоненты (медь, железо, сера и др.)

2) Общее количество штейна:

$$G_{шт} = \sum_i G_{шт}^i + G_{шт}^{неучт}$$

3) Состав штейна, т.е. содержание отдельных компонентов (i), определяется уравнением:

$$\alpha_{шт}^i = \frac{G_{шт}^i}{G_{шт}}$$

В металлургических расчетах обычно задается состав штейна по содержанию меди и других компонентов. В этом случае количество штейна определяется по уравнению

$$G_{шт} = \frac{G_{шт}^{Cu}}{\alpha_{шт}^{Cu}}, \quad (3.3)$$

где $\alpha_{шт}^{Cu}$ содержание меди в штейне. Количество любого компонента (i) в штейне определяется по выражению

$$G_{шт}^i = G_{шт} \alpha_{шт}^i$$

Процесс расплава. Расчет количества и состава шлака. В шлак переходят компоненты из исходного сырья и продукты реакций, происходящих в печи: восстановления оксидов, окисление, шлакообразование и пр.

Общее выражение для определения количества компонентов в шлаке получается из уравнения:

$$G_{шл}^i = \sum_j^n \beta_{j/шл}^i \alpha_j^i G_j \quad (3.4)$$

1) Количество оксида кальция (CaO) в шлаке

$$G_{шл}^{CaO} = \sum_j^n \beta_{j/шл}^{CaO} \alpha_j^{CaO} G_j = \beta_{шх/шл}^{CaO} \alpha_{шх}^{CaO} G_{шх} + \beta_{пшх/шл}^{CaO} \alpha_{пшх}^{CaO} G_{пшх} + \beta_{кшл/шл}^{CaO} \alpha_{кшл}^{CaO} G_{кшл}$$

Аналогично этому уравнению пишутся уравнения для расчета количества и состава шлака других компонентов.

2) Расчет суммарного количества шлака:

$$G_{шл} = G_{шл}^i + G_{шл}^{неучт}$$

Расчет количества и состава отходящих технологических газов. Отходящие технологические газы образуются за счет подаваемого в печь дутья: воздух (на горение и транспорт пылеугольной смеси), кислород, газ и образующихся в печи газообразных продуктов химических реакций горения, восстановления, диссоциации, испарения кристаллизационной и обычной влаги и пр.

Считая известными все входные материальные потоки и задаваясь химическими реакциями, протекающими в печи, можно определить массовое количество основных (учитываемых) компонентов и пересчитать их содержание в отходящих газах:

1) Газы от восстановления оксидов шихты:

$$G^{CO} = \sum_j \beta_{j/шл}^{CO} \alpha_j^{CO} G_j \quad (3.5)$$

3.2.2 Структура модели теплового режима комплекса

Тепловой баланс процесса плавки и получение штейна и шлака в печи Ванюкова. На рисунке 3.2 представлена общая схема теплового баланса плавки, которая отражает все виды приходящего и уходящего тепла.

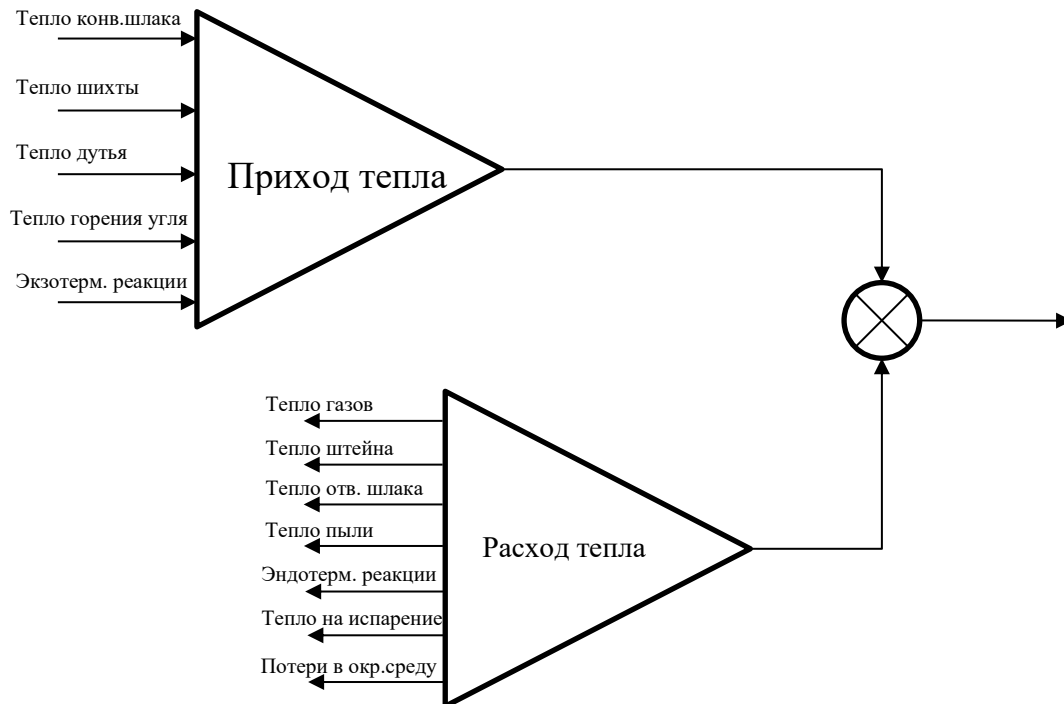


Рисунок 3.2 – Схема теплового баланса процесса плавки

Основными источниками прихода тепла являются (на n кг шихты):

1) Физическое тепло исходных материалов шихты:

$$Q^{\text{мат}} = \sum_t^n M_t^{\text{мат}} \cdot C_t^{\text{мат}} \cdot T_t^{\text{мат}}$$

где $Q^{\text{мат}}$ – тепло материалов;

$M_t^{\text{мат}}$ – масса t -ного входного материала;

$C_t^{\text{мат}}$ – средняя теплоемкость t -ного входного материала;

$T_t^{\text{мат}}$ – температура t -ного входного (исходного) материала.

2) Тепло шихты:

$$Q_{\text{шх}}^1 = \sum M_{\text{шх}}^{\text{мат}} \cdot C_{\text{шх}}^{\text{мат}} \cdot T_{\text{шх}}^{\text{мат}}$$

3) Тепло конвертерного шлака:

$$Q_{\text{кшл}}^2 = \sum M_{\text{кшл}}^{\text{мат}} \cdot C_{\text{кшл}}^{\text{мат}} \cdot T_{\text{кшл}}^{\text{мат}}$$

4) Суммарное физическое тепло материалов:

$$Q^{\text{мат}} = Q_{\text{шх}}^1 + Q_{\text{кшл}}^2$$

5) Тепло воздушного дутья:

$$Q_{\text{д}}^3 = \sum M_{\text{д}}^{\text{возд}} \cdot C_{\text{д}}^{\text{возд}} \cdot T_{\text{д}}^{\text{возд}} = M_{\text{д}}^{\text{O}_2} \cdot C_{\text{д}}^{\text{O}_2} \cdot T_{\text{д}}^{\text{O}_2} + M_{\text{д}}^{\text{N}_2} \cdot C_{\text{д}}^{\text{N}_2} \cdot T_{\text{д}}^{\text{N}_2}$$

6) Тепло экзотермических реакций

Экзотермические реакции:

$$\begin{aligned} S + O_2 &\rightarrow SO_2 \\ CaO + SiO_2 &\rightarrow Ca_2SiO_4 \\ Fe_2O + SiO_2 &\rightarrow Fe_2SiO_4 \\ Q_{\text{экз}} &= - \sum dH_{\text{Т}} \cdot \frac{M_{\text{компл}}}{M_{\text{м}}} \end{aligned}$$

где $Q_{\text{экз}}$ - тепло при плавке;

$$Q_{\text{экз}} = - \left(dH_{\text{Т}} \cdot \frac{M_{S \cdot O_2}}{M_{\text{м}}} + dH_{\text{Т}} \cdot \frac{M_L}{M_{\text{м}}} + dH_{\text{Т}} \cdot \frac{M_B}{M_{\text{м}}} \right)$$

где обозначению L соответствует Ca_2SiO_4 , B - Fe_2SiO_4 .

7) Тепловая энергия за счет сжигания топлива (горения угля):

$$Q_{\text{сжт}} = \sum q_{\text{Т}} \cdot M_{\text{Т}}$$

где $q_{\text{Т}}$ – низшая теплота сгорания топлива на рабочую массу, кДж/кг

$$Q_{\text{сжт}} = \sum q_{\text{Т}} \cdot M_{\text{Т}} = q_{C_2H_8} \cdot M_{C_2H_8} + q_{C_4H_{10}} \cdot M_{C_4H_{10}}$$

Основными источниками расхода тепла являются (на n кг шихты):

8) Тепло выводимых из процесса продуктов:

$$Q^{\text{прод}} = \sum_m^n M_m^{\text{прод}} \cdot C_m^{\text{прод}} \cdot T_m^{\text{прод}}$$

9) Тепло штейна:

$$Q_{\text{шт}}^1 = \sum M_{\text{шт}}^{\text{прод}} \cdot C_{\text{шт}}^{\text{прод}} \cdot T_{\text{шт}}^{\text{прод}}$$

10) Тепло отвального шлака:

$$Q_{\text{шл}}^2 = \sum M_{\text{шл}}^{\text{прод}} \cdot C_{\text{шл}}^{\text{прод}} \cdot T_{\text{шл}}^{\text{прод}} + M_{\text{шл}}^{\text{неуч}} \cdot C_{\text{шл}}^{\text{неуч}} \cdot T_{\text{шл}}^{\text{неуч}}$$

11) Тепло пыли:

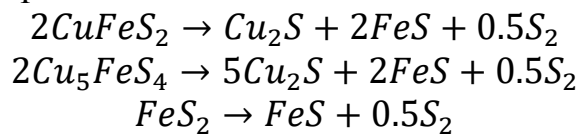
$$Q_{\text{пл}}^3 = \sum M_{\text{пл}}^{\text{прод}} \cdot C_{\text{пл}}^{\text{прод}} \cdot T_{\text{пл}}^{\text{прод}} + M_{\text{пл}}^{\text{неуч}} \cdot C_{\text{пл}}^{\text{неуч}} \cdot T_{\text{пл}}^{\text{неуч}}$$

12) Тепло газов:

$$Q_{\text{газ}}^4 = \sum M_{\text{газ}}^{\text{прод}} \cdot C_{\text{газ}}^{\text{прод}} \cdot T_{\text{газ}}^{\text{прод}}$$

13) Тепло эндотермических процессов

Эндотермические реакции:



$$Q_{\text{энд}} = - \sum dH_T \cdot \frac{M_{\text{компл}}}{M_m}$$

Тепловой баланс:

$$Q_{\text{шх}}^1 + Q_{\text{кшл}}^2 + Q_{\text{д}}^3 + Q_{\text{экз}} + Q_{\text{сжт}} = Q_{\text{шт}}^1 + Q_{\text{шл}}^2 + Q_{\text{пл}}^3 + Q_{\text{газ}}^4 + Q_{\text{энд}}$$

3.3 Реализация компьютерной модели управления тепловым и материальным режимами процесса плавки

Компьютерная модель управления режимами печи разработана в MATLAB Simulink (см. рисунки 3.3-3.5). На рисунке 3.3 представлена общая структурная схема модели управления процессом плавки Ванюкова по тепловому и материальному режимам.

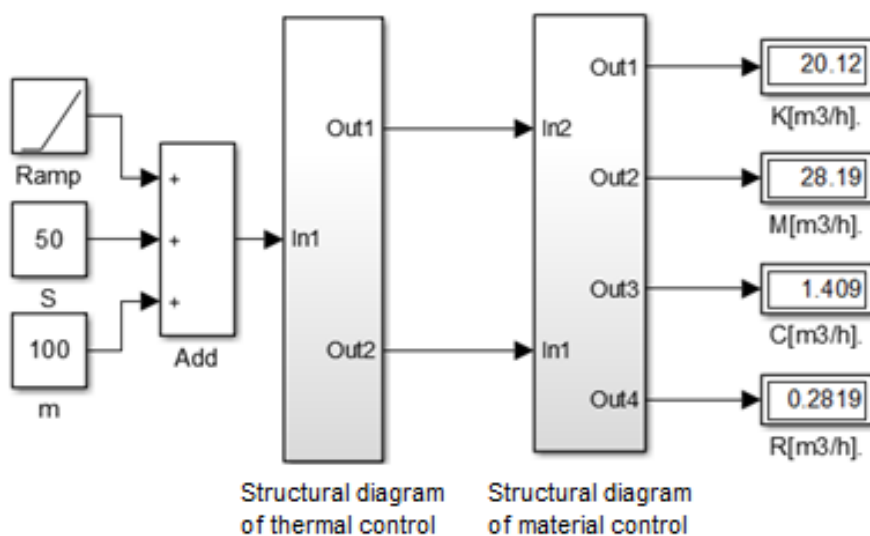


Рисунок 3.3 – Структурная схема управления тепловым и материальным режимами процесса плавки

Как видно из рисунка 3.3, структурная схема математической модели состоит из двух подсистем: подсистемы расчета теплового баланса и подсистемы расчета материального баланса. Разработанная математическая модель управления процессом плавки достаточно хорошо описывает динамику состояния процесса как при установлении воздействий, направленных на увеличение нагрева печи, так и на снижение ее нагрева.

На рисунках 3.4, 3.5 показаны: подсистема расчета теплового баланса, которая позволит при расчете материальных потоков шихты отслеживать изменения теплового состояния расплава (по содержанию меди в штейне) и сами подсистемы для расчета материальных потоков шихты. Эти подсистемы расчета теплового баланса и материальных потоков шихты состоят из блоков математических операций и функциональных блоков библиотеки Simulink.

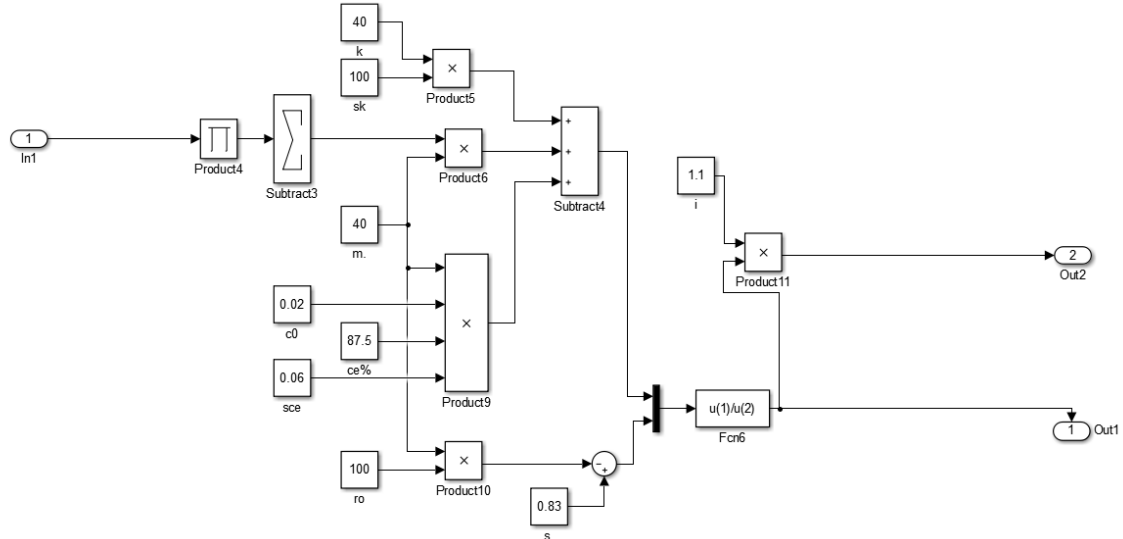


Рисунок 3.4 – Подсистема 1 расчета теплового баланса

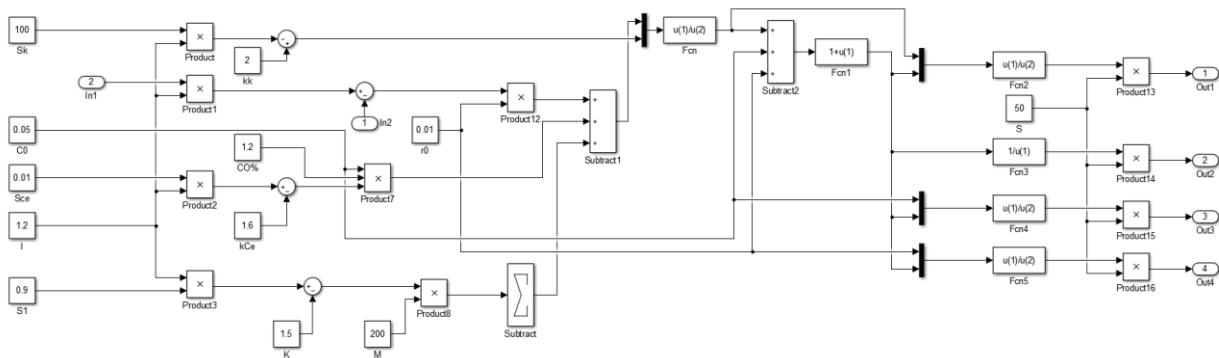


Рисунок 3.5 – Подсистема 2 расчета материальных потоков шихты

штейне. Это связано с переменным влиянием этих параметров на тепловой режим расплава. Принудительное регулирование расхода природного газа и концентрации кислорода в дутье с целью регулирования содержания меди в штейне может привести к результатам, противоположным ожидаемым [40].

Обсуждение результатов. Расчет динамических характеристик печи должен основываться на фундаментальных знаниях теории и практики современных «автогенных» процессов, а также общих закономерностях переходных процессов, полученных с помощью динамической модели процесса плавки [41].

3.4 Постановка задачи синтеза гибридного управления

Задача гибридного управления в наиболее общем случае формулируется следующим образом:

Найти управляющие воздействия $u_1, u_2, \dots, u_n$, обеспечивающие экстремальное значение функции цели:

$$\max_{u,y,x} \Phi = \sum_i \varphi_i(x_i, y_i, u_i)$$

при условиях, которые определяют:

связь между входами и выходами технологических участков

$$y_i = f_i(x_i, u_i)$$

топологическую структуру производства

$$x_{ij} = y_{kl}$$

технологические ограничения

$$x_{imin} \leq x_i \leq x_{imax} \quad y_{imin} \leq y_i \leq y_{imax} \quad u_{imin} \leq u_i \leq u_{imax}$$

Задача гибридного управления имеет высокую размерность, поэтому решение будет проводиться методом системного анализа, т.е. разбиением задачи управления на несколько подзадач меньшей размерности. При этом система управления приобретает иерархическую структуру (двухуровневая система).

3.5 Разработка алгоритма синтеза системы управления сложным технологическим комплексом плавки Ванюкова

Для реализации математической модели первым необходимо описание алгоритма управления технологическим комплексом плавки Ванюкова, а именно режимом шихтоподготовки, плавки и утилизации тепла.

Описание алгоритма управления технологическим комплексом процесса ПВ, а именно управлением процесса шихтоподготовки, процессом плавки и процессом утилизации тепла, дано в соответствии с блок-схемой алгоритма (рисунок 3.8).

Блок 1 – Первым шагом является сбор и обработка информации от датчиков, преобразователей, а также с устройств ручного ввода от операторов подпрограммой блока. Также он формирует исходные данные для решения задач управления.

Блок 2 – Далее производится расчет значений переменных X_{1k} и X_{2k} на текущем шаге и для $(k+1)$.

Блок 3 – Затем производится вычисления критерия T в зависимости от переменных состояния $X_1(k+1)$ и $X_2(k+1)$.

Блок 4 – Сравнивается текущее значение шага по управляющим переменным $\Delta U(k+1)$ с заданными значениями шага $\Delta U_{\text{зад}}$. В случае $\Delta U(k) = \Delta U_{\text{зад}}$ приводим в блок 6, все операции повторяются в случае отклонения от данного условия.

Блок 6 – Производится вывод управляющего воздействия на ОУ.

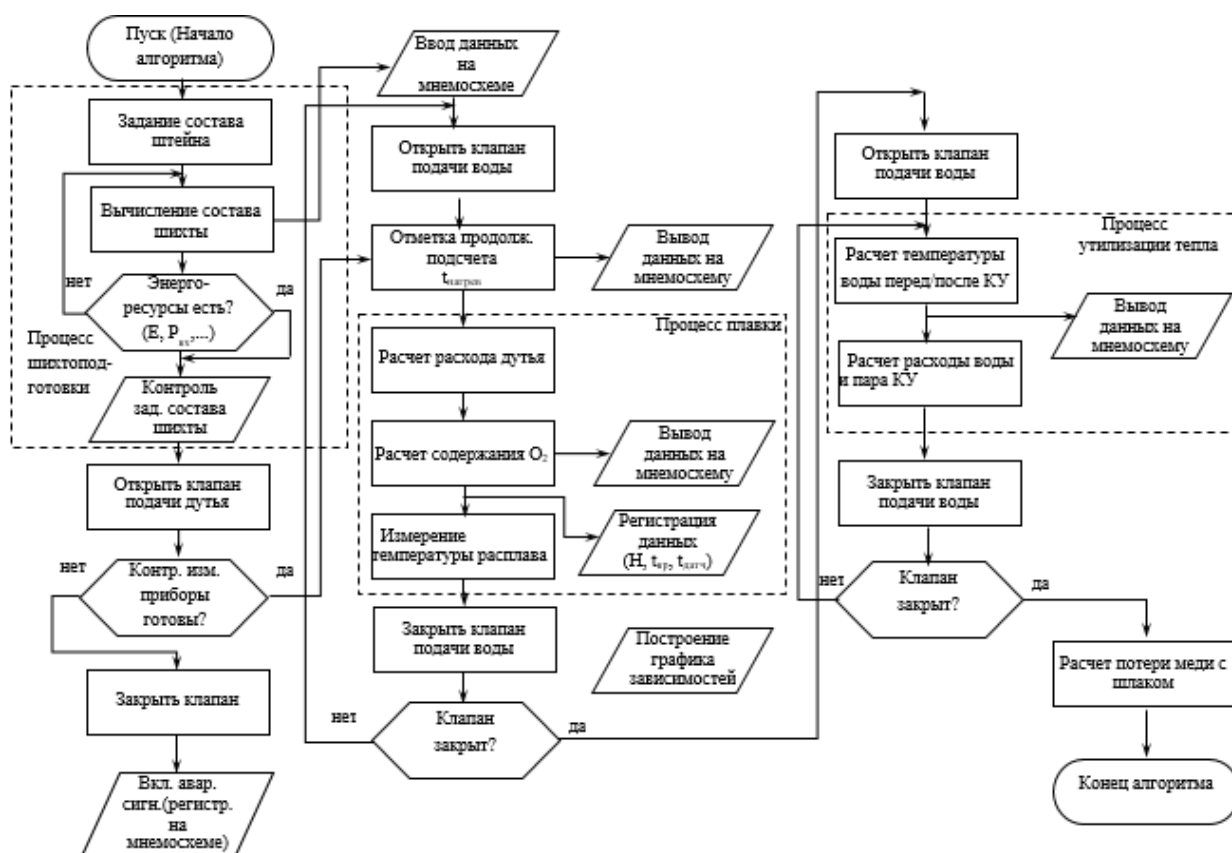


Рисунок 3.8 – Блок-схема алгоритма синтеза системы управления ТК ПВ

Алгоритм предназначен для определения состава штейна и шлака, а также для оценки потерь меди с отвальным шлаком в зависимости от технологической производительности, химико-физических характеристик исходной шихты, расхода дутья, содержания кислорода в нем, режима манометрического давления и иных факторов. В связи с этим, формулировка задачи управления сводится к следующему: *для заданных параметров шихты необходимо определить такие значения расхода дутья, содержания кислорода в нем, а также расхода шихты и*

подшихтовочных материалов, которые обеспечивают достижение целевого состава штейна при условии соблюдения технологических ограничений по расходу шихты, потерям меди с отвальным шлаком, температуре в печи, расходу дутья, содержанию кислорода в дутье, а также уровню расходов воды и пара в системе КУ.

Наиболее простым подходом является отказ от разработки детальной модели сложного технологического комплекса и вместо этого – создание модели управления, основанной на экспертных знаниях, практическом опыте и интуиции операторов-технологов, длительно эксплуатирующих данный объект. Такой подход позволяет исключить необходимость дорогостоящих и трудоемких мероприятий по идентификации точной модели и разработке соответствующих алгоритмов оптимизации управления, и сразу перейти к формированию методов регулирования процесса без детального моделирования его особенностей.

3.6 Заключение по разделу

1. Разработана математическая модель зависимости входных и выходных материальных потоков процесса выплавки медных концентратов в печи Ванюкова.

2. На основе уравнений материального и теплового баланса разработана структура компьютерной модели для целей оперативного планирования и управления сложным технологическим процессом плавки.

3. На основе моделей можно сформировать структуру замкнутой динамической модели, учитывающей как кинетику, так и гидродинамику процессов, протекающих в процессах плавки. Однако для создания оптимальной системы управления необходимо проведение работ по идентификации модели и проверке ее адекватности, что требует проведения достаточно сложных, длительных, трудоемких и дорогостоящих исследований, как кинетики, так и гидродинамики процесса.

4. В описанных условиях эффективнее будет не создавать математическую модель сложного процесса процесса выплавки меди, а разрабатывать модель управления этим процессом на основе опыта, знаний и интуиции операторов-технологов, работающих долгое время в данном производстве.

Результаты, изложенные в данном разделе, были опубликованы в научных статьях: [51], [52], [53].

4 СИНТЕЗ МОДЕЛЕЙ И АЛГОРИТМОВ ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА И ОБРАБОТКИ БОЛЬШИХ ДАННЫХ

4.1 Анализ и обработка больших данных процесса в ПВ на БМЗ

Данные были собраны с помощью SCADA-системы, которая обеспечивает мониторинг и управление технологическими процессами. В процессе исследования были собраны данные о содержании различных элементов в шихте и шлаке, а также параметры, влияющие на процесс плавки, такие как температура, давление и расход кислорода. Модель построена на основе больших данных, полученных с Балхашского медеплавильного производства, с использованием современных методов системной идентификации. Полученные результаты могут быть использованы для разработки более эффективных систем автоматического управления.

На рисунках 4.1-4.11 приводятся тренды, составленные из полученных опытных данных за летний период (около 19800 данных). На рисунке 4.1 представлен график входного параметра - содержание Si в шихте.

На рисунке 4.2 представлен график выходного параметра - содержание Si в штейне, а на рисунке 4.3 представлен график выходного параметра - содержание Si в шлаке.

Таким образом на рисунках 4.4 - 4.11 показаны графики временных последовательностей остальных входных и выходных параметров содержания таких элементов как Zn , CaO , SiO_2 и Fe соответственно в шихте и шлаке.

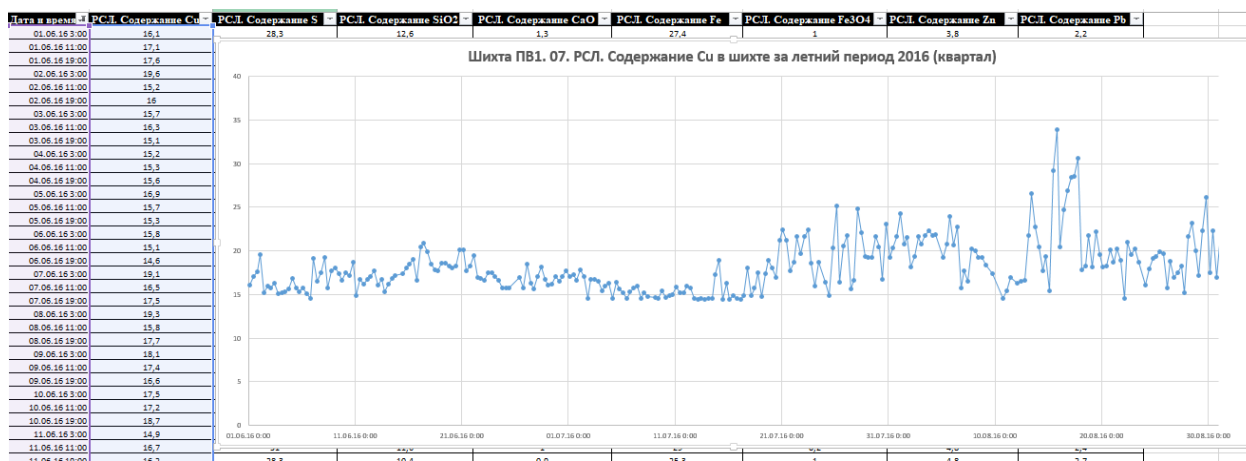


Рисунок 4.1 – Временная последовательность параметра «Содержание Si в шихте» за летний период.

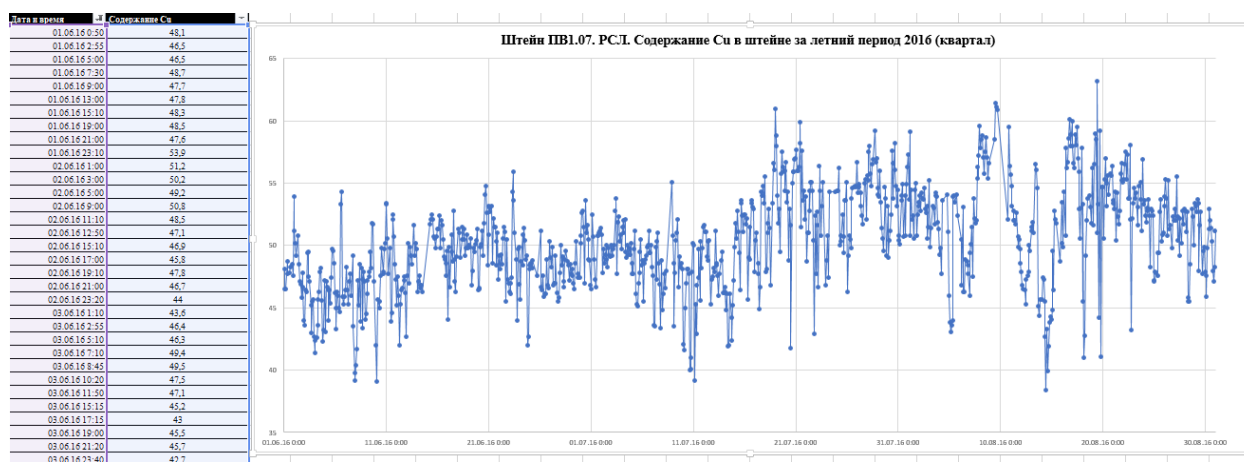


Рисунок 4.2 – Временная последовательность параметра «Содержание Si в штейне» за летний период.

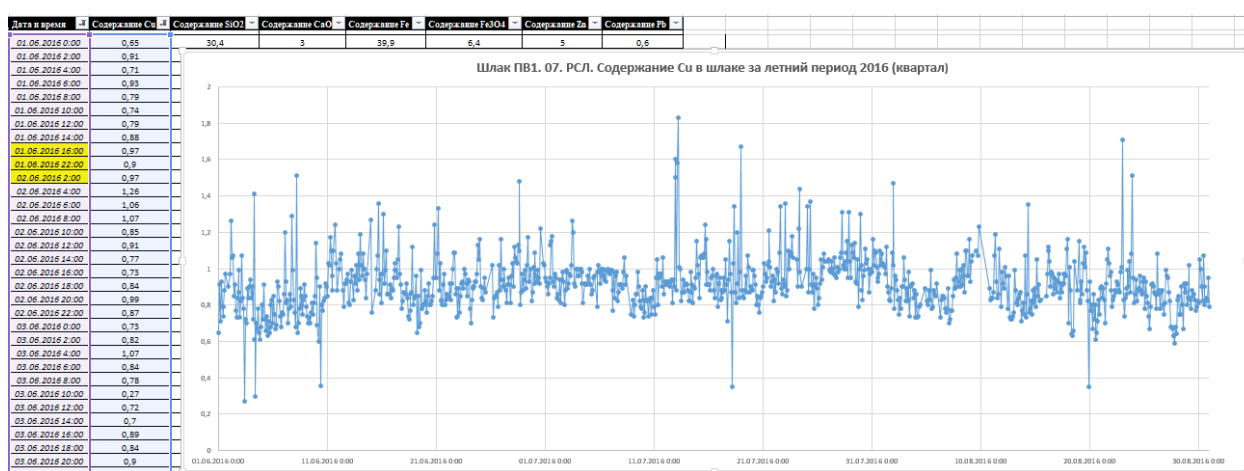


Рисунок 4.3 – Временная последовательность параметра «Содержание Si в шлаке» за летний период.

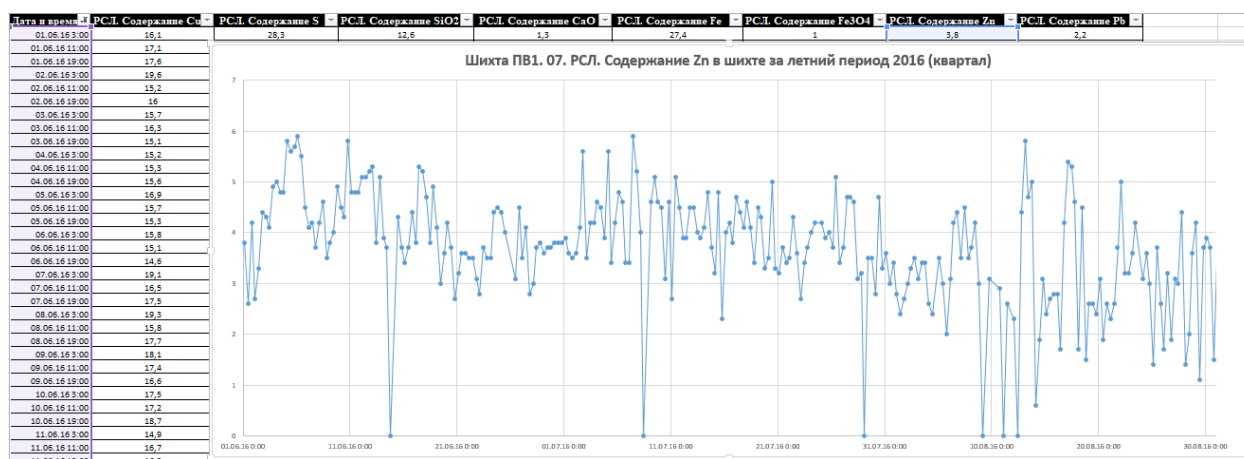


Рисунок 4.4 – Временная последовательность параметра «Содержание Zn в шихте» за летний период.

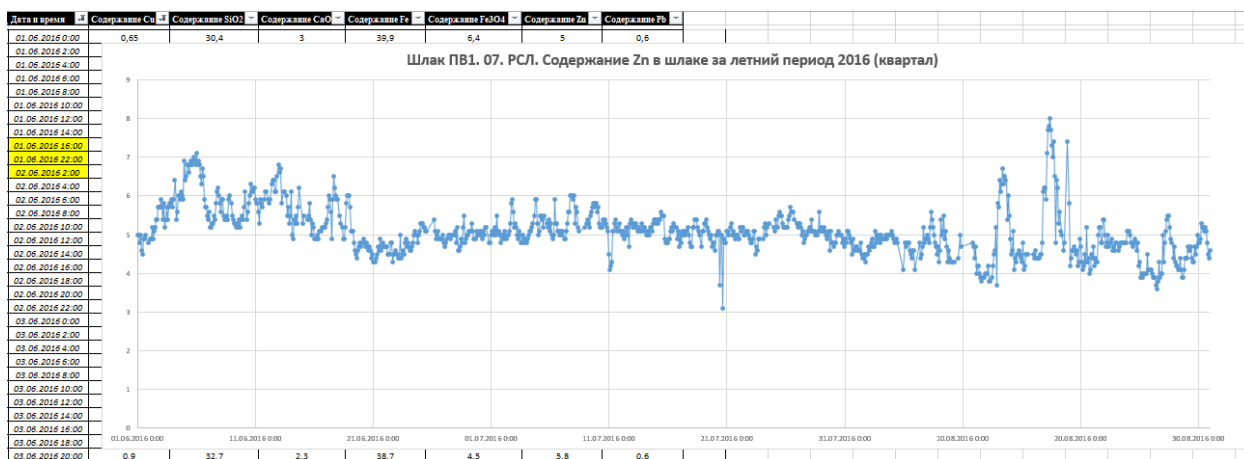


Рисунок 4.5 – Временная последовательность параметра «Содержание Zn в шлаке» за летний период.

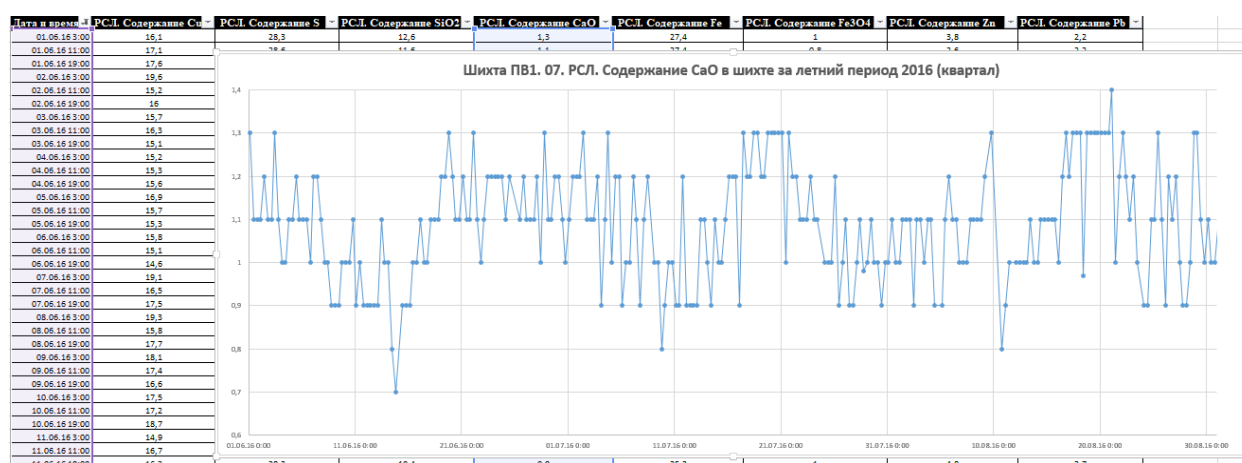


Рисунок 4.6 – Временная последовательность параметра «Содержание CaO в шихте» за летний период.

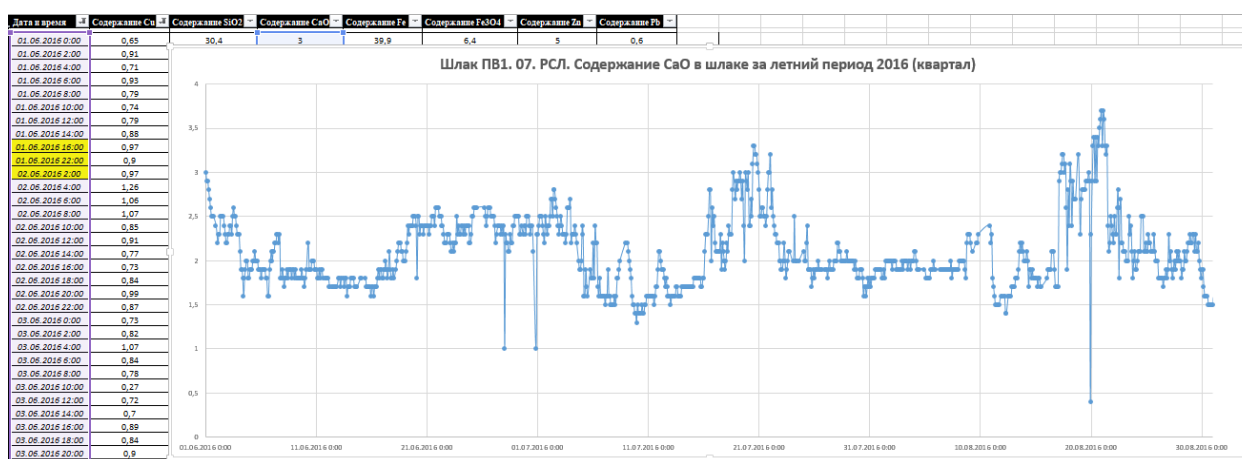


Рисунок 4.7 – Временная последовательность параметра «Содержание CaO в шлаке» за летний период.

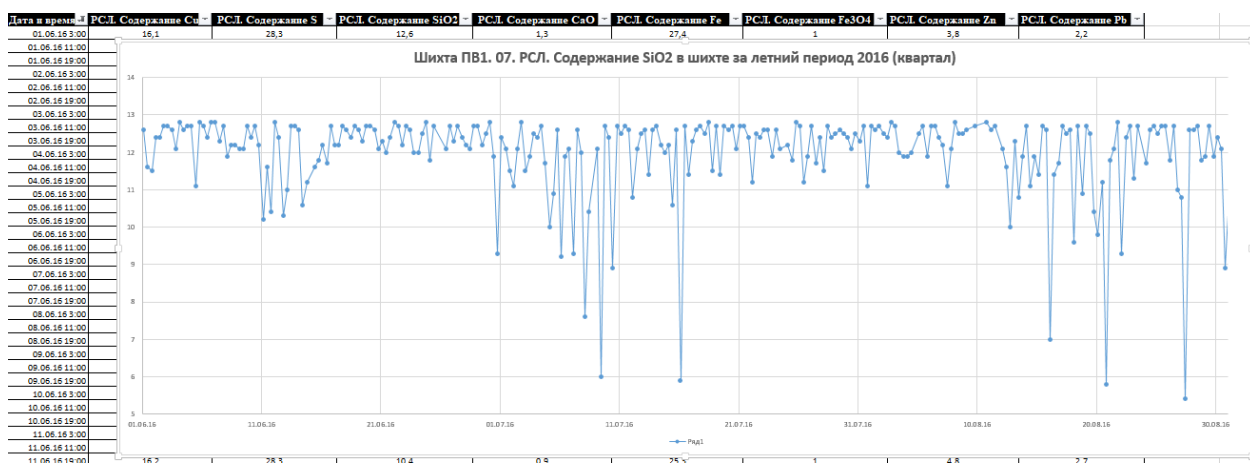


Рисунок 4.8 – Временная последовательность параметра «Содержание SiO₂ в шихте» за летний период.

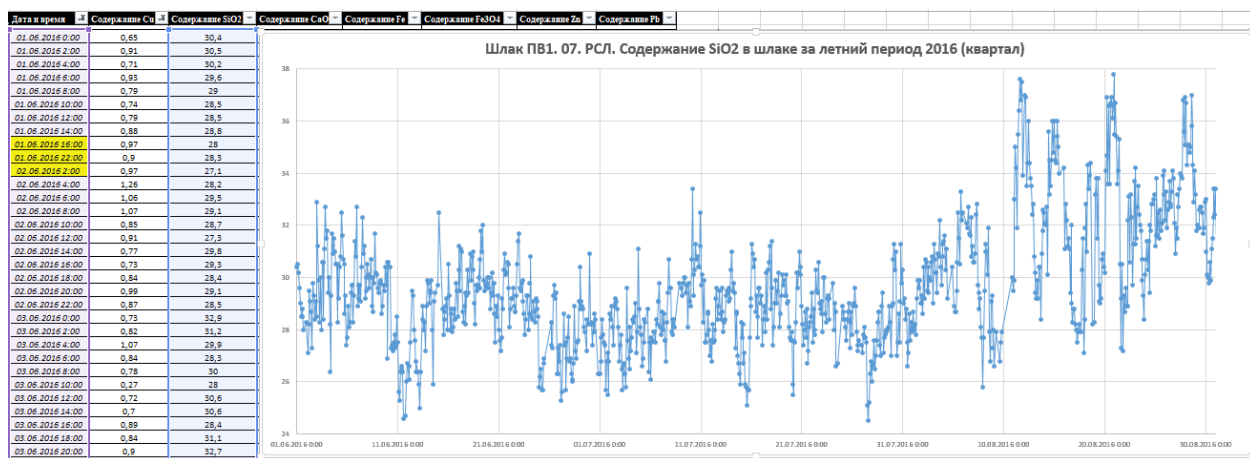


Рисунок 4.9 – Временная последовательность параметра «Содержание SiO₂ в шлаке» за летний период.

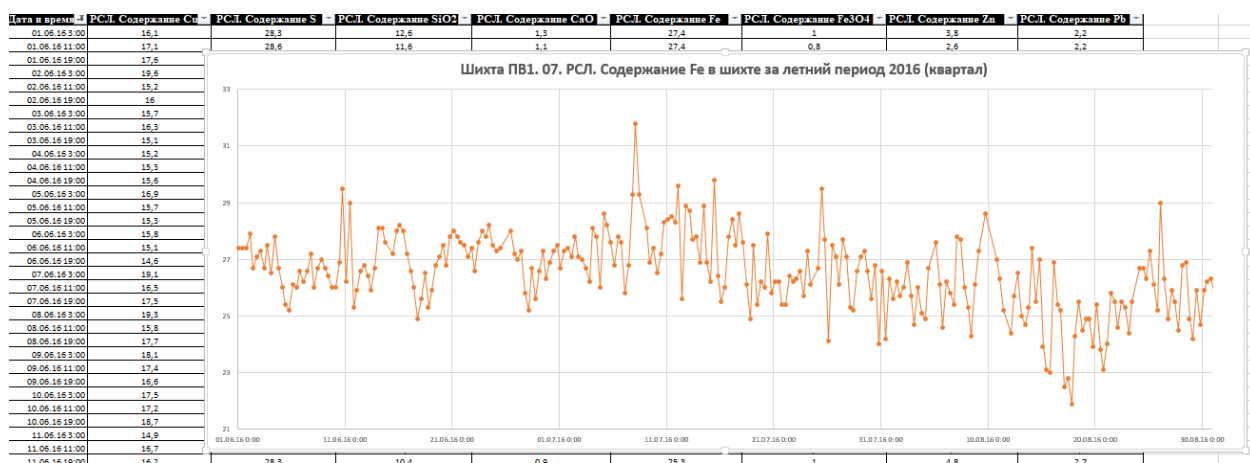


Рисунок 4.10 – Временная последовательность параметра «Содержание Fe в шихте» за летний период.

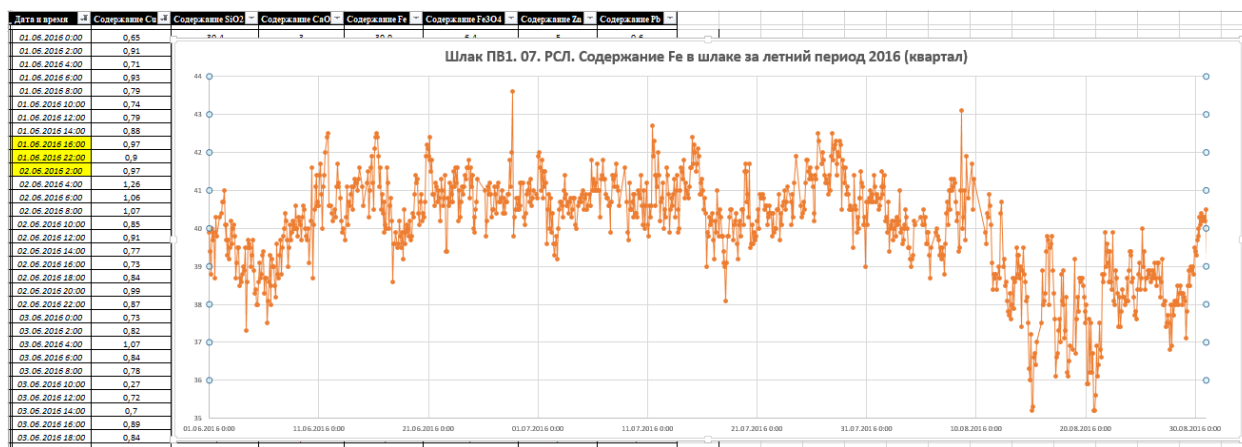


Рисунок 4.11 – Временная последовательность параметра «Содержание Fe в шлаке» за летний период.

4.2 Обработка полученных опытных данных и на их основе выполнение параметрической идентификации математической модели

Обработка данных проводилась с использованием MatLAB и пакета System Identification Toolbox (SIT). Применялись методы корреляционного анализа для выявления взаимосвязей между входными и выходными параметрами. Временные ряды данных были проанализированы на наличие автокорреляции и взаимокорреляции, что позволило определить ключевые зависимости. На рисунке 4 представлено главное окно пакета SIT MatLAB [35]. С помощью данного пакета проводилась параметрическая идентификация системы и в итоге мы получили математическую модель объекта в виде передаточных функций по каждому каналу регулирования.

Рассмотрим характеристику каждого канала с точки зрения его влияния на техническое состояние соответствующего элемента в процесс плавки Ванюкова.

1) Канал «Содержание Si в шихте - Содержание Si в шлаке». На рисунке 4.12 представлен график взаимокорреляции входных и выходных значений по каналу «Шихта – Шлак», где входными значениями являются – процентное содержание Fe в шихте за июнь, июль, август, а выходными - процентное содержание Fe в шлаке за июнь, июль, август.

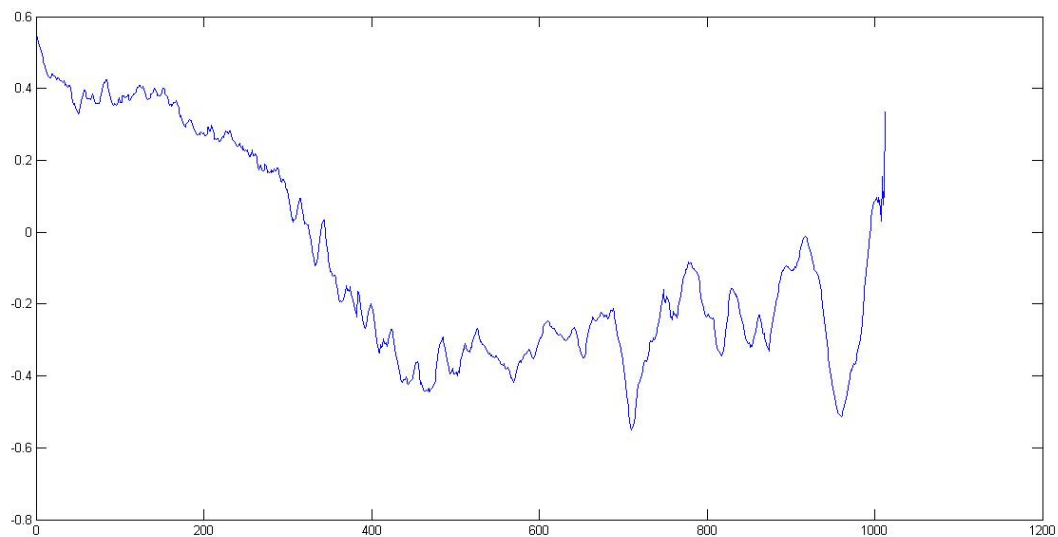


Рисунок 4.12 – График взаимокорреляции входных и выходных значений по каналу «Шихта – Шлак». Коэффициент корреляции по графику равен - 0.55

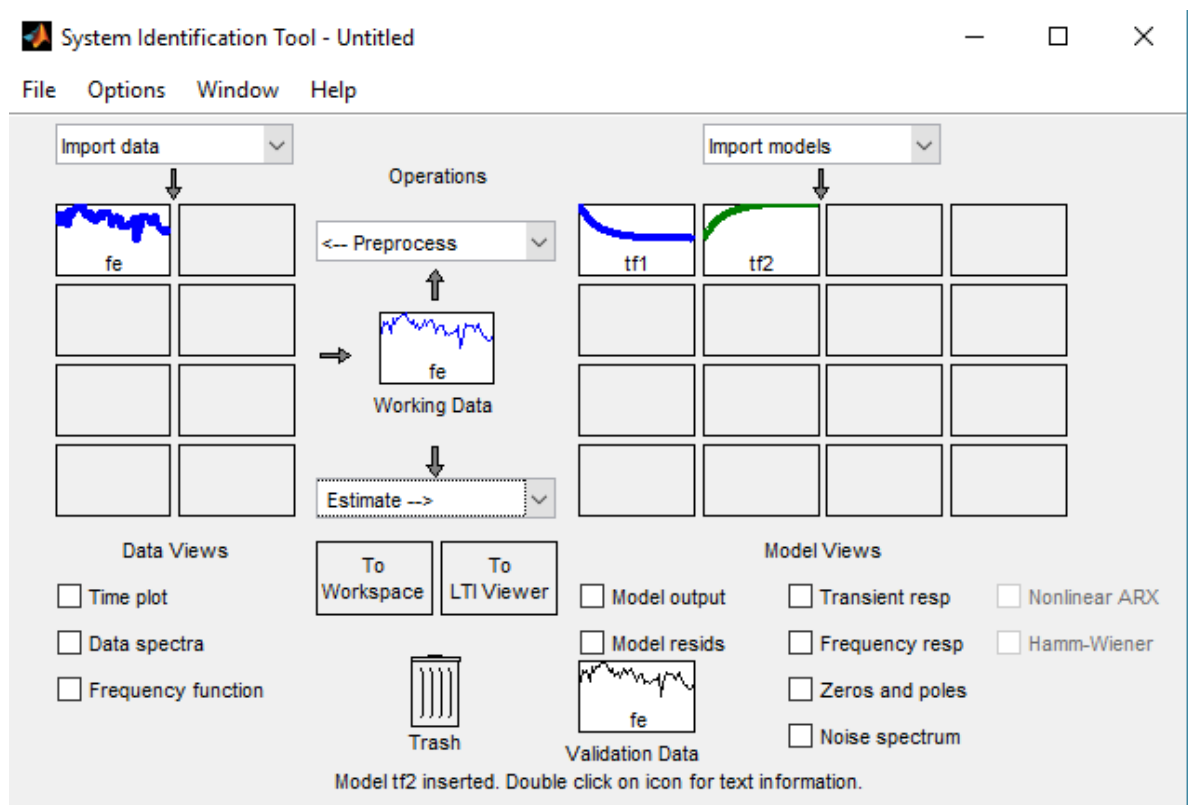


Рисунок 4.13 – Главное окно System Identification Toolbox

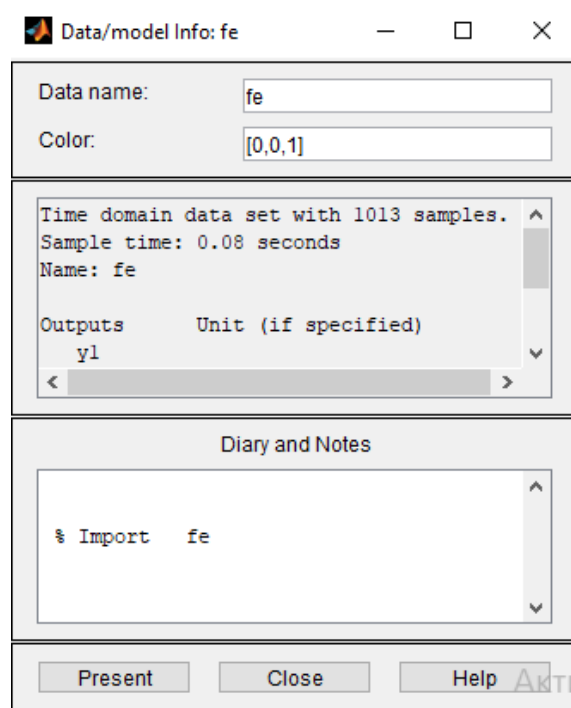
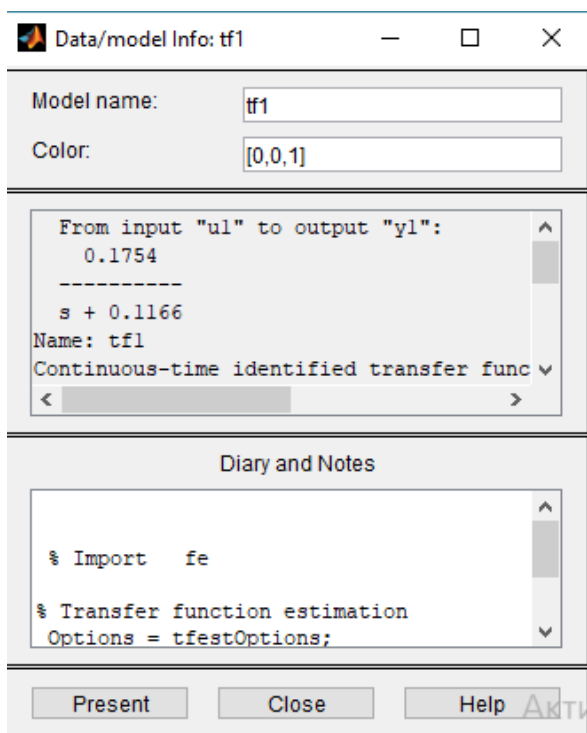
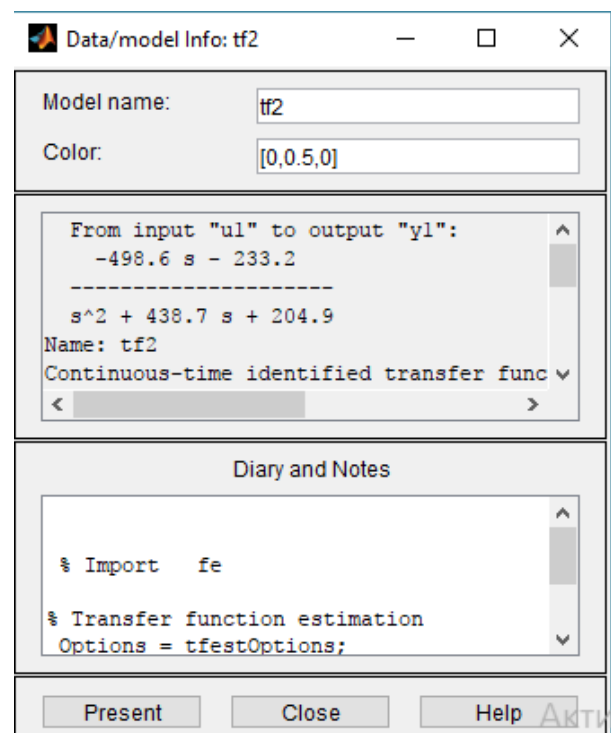


Рисунок 4.14 - Реальная fe-модель (real system) построенная по известным данным (входные и выходные значения)



цвет – синий



- зеленый

Рисунок 4.15 – tf1-модель transfer function (полей 1, нулей 0) и tf2 -модель transfer function (полей 2, нулей 1)

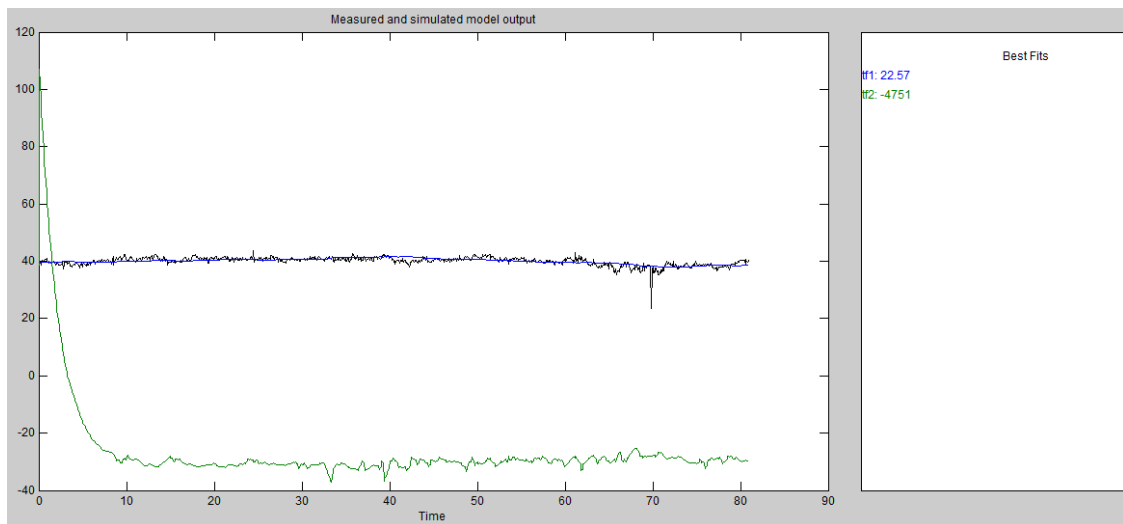


Рисунок 4.16 - Построенные модели (estimate models) в сравнении с реальной моделью. В окне Best fits – схожесть построенной модели с реальной в процентах

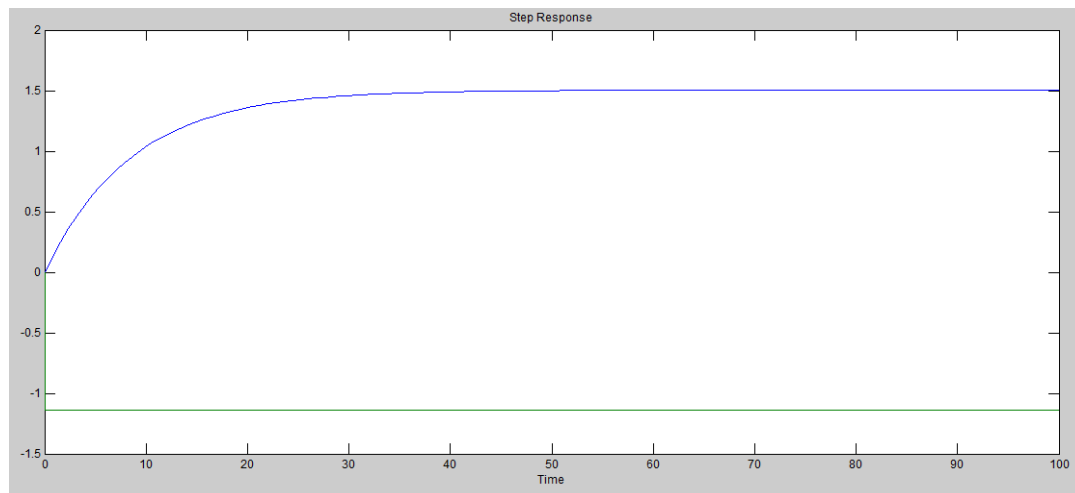


Рисунок 4.17 – Переходная характеристика построенных моделей (реакция на единичное ступенчатое воздействие)

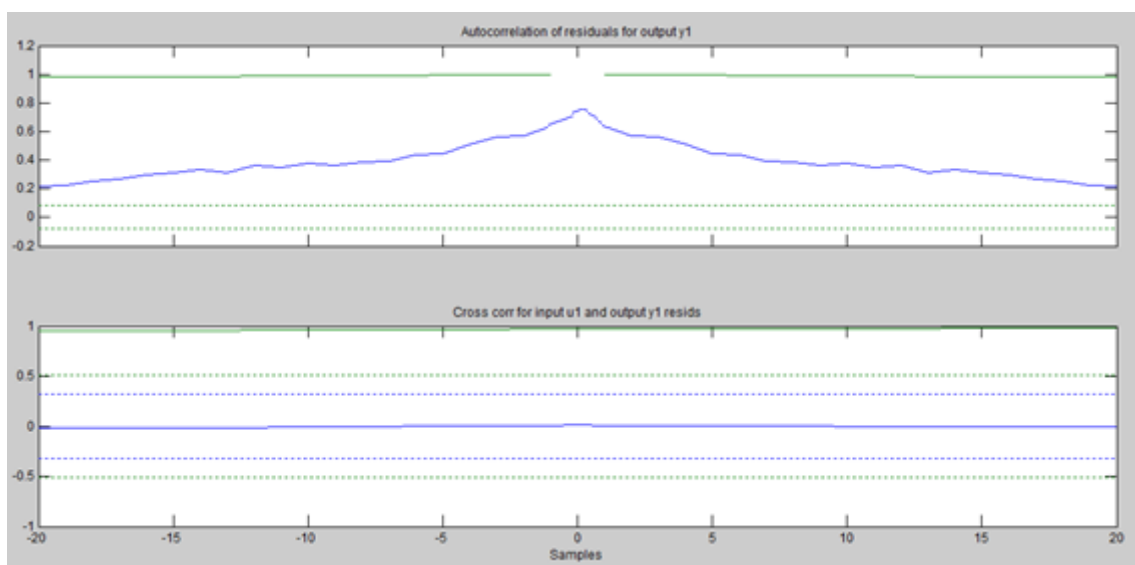


Рисунок 4.18 - Автокорреляция и взаимокорреляция двух параметров

Как видно из рисунка 4.18 – коэффициент автокорреляции равен 0.8, что свидетельствует о сильной положительной связи между значениями временного ряда и его собственными прошлыми значениями. Это означает, что если в прошлом значение было выше среднего, то с большой вероятностью текущее значение также будет выше среднего, и наоборот.

2) Канал «Содержание Zn в шихте - Содержание Zn в шлаке». На рисунке 4.19 представлен график взаимокорреляции входных и выходных значений по каналу «Шихта – Шлак», где входными значениями являются – процентное содержание Zn в шихте за июнь, июль, август, а выходными - процентное содержание Zn в шлаке за июнь, июль, август.

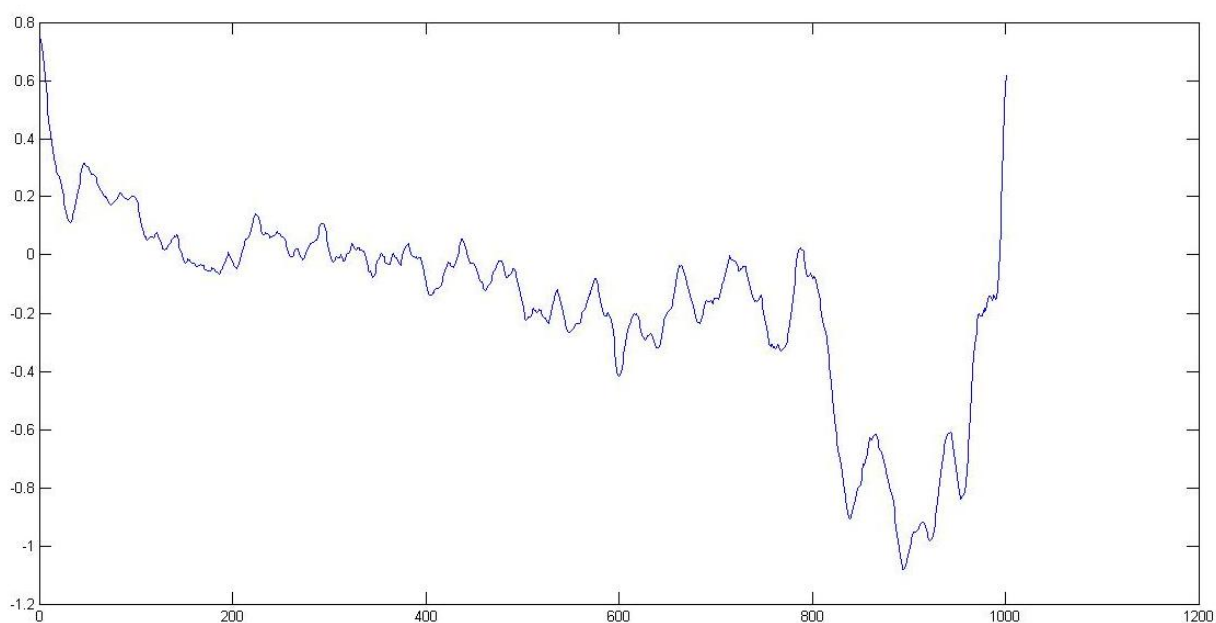


Рисунок 4.19 – График взаимокорреляции входных и выходных значений по каналу «Шихта – Шлак». Коэффициент корреляции по графику равен - 0.74

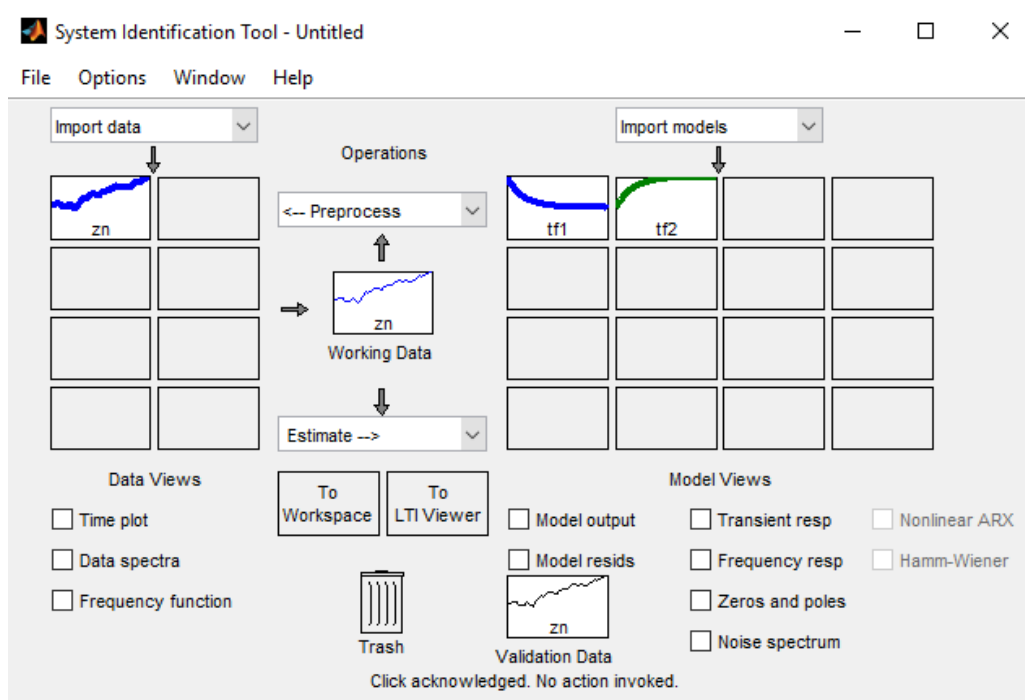


Рисунок 4.20 – Главное окно интерактивного инструмента System Identification Toolbox

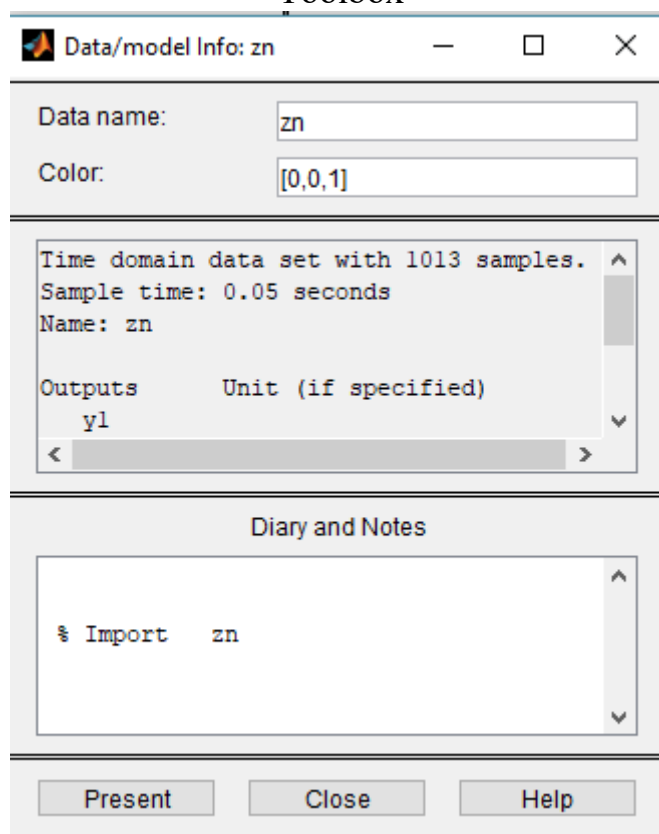


Рисунок 4.21 – Реальная zn-модель (real system) построенная по известным данным (входные и выходные значения)

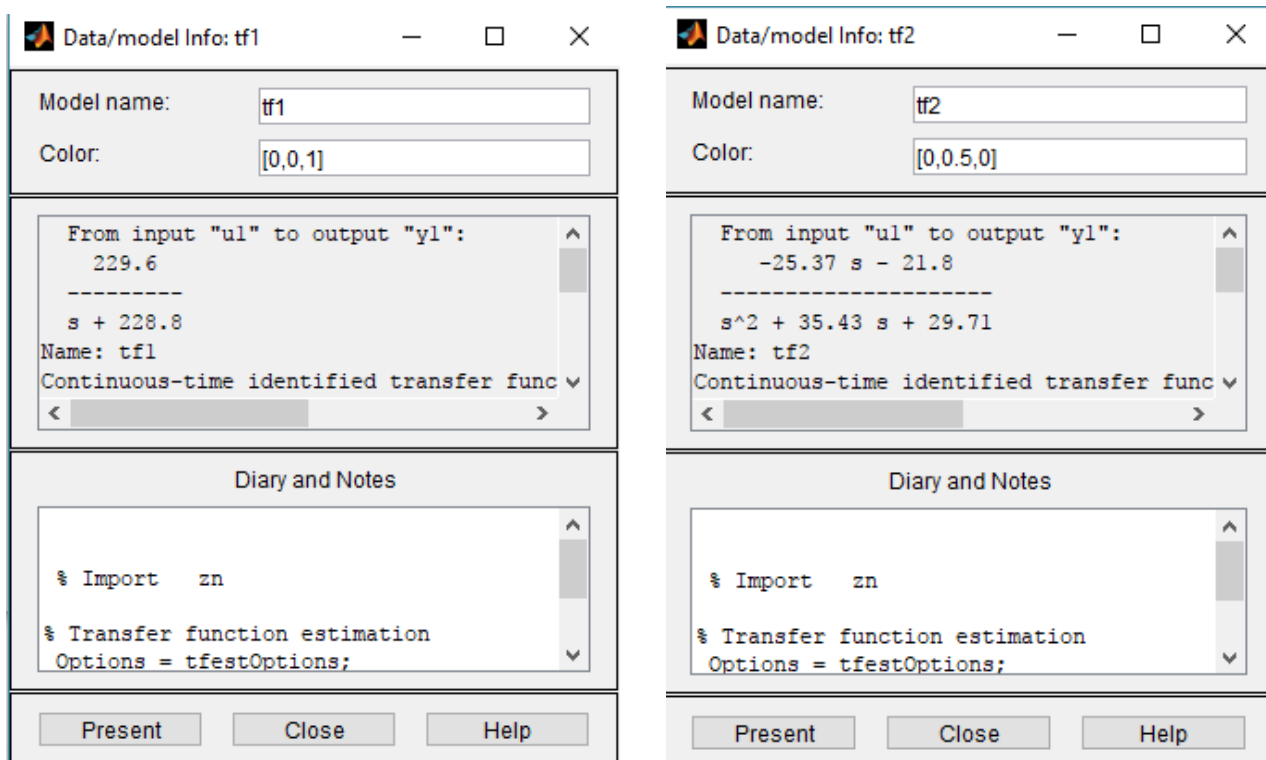


Рисунок 4.22 – tf1-модель transfer function (полей 1, нулей 0) и tf2 -модель transfer function (полей 2, нулей 1)

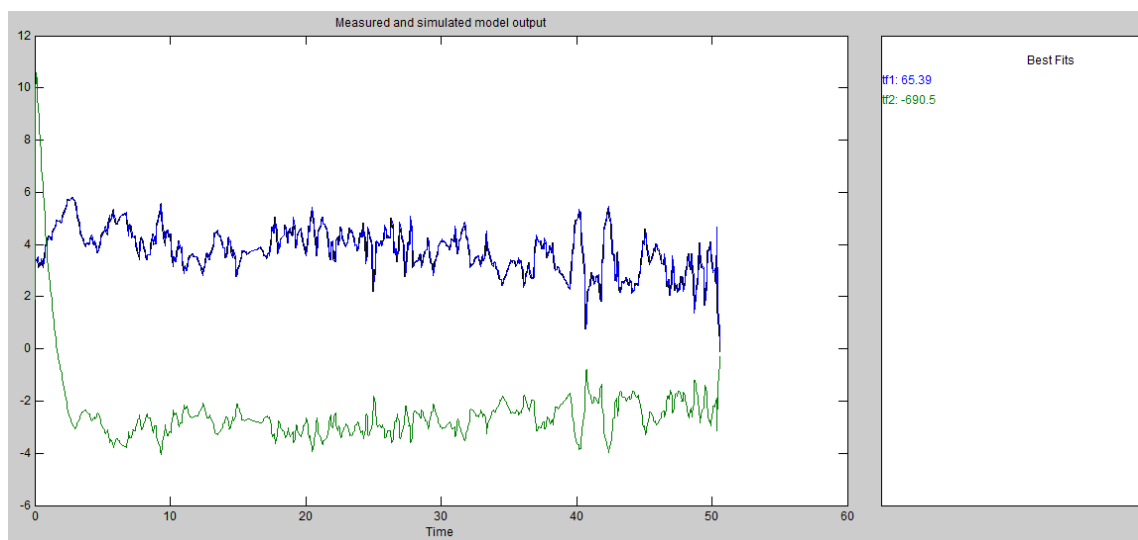


Рисунок 4.23 - Построенные модели (estimate models) в сравнении с реальной моделью. В окне Best fits – схожесть построенной модели с реальной в процентах

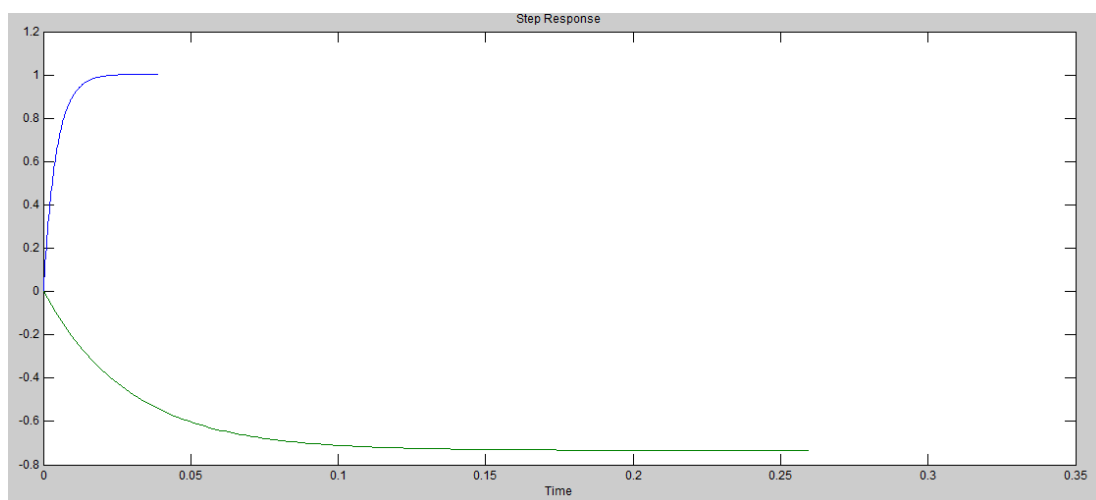


Рисунок 4.24 – Переходная характеристика построенных моделей (реакция на единичное ступенчатое воздействие)

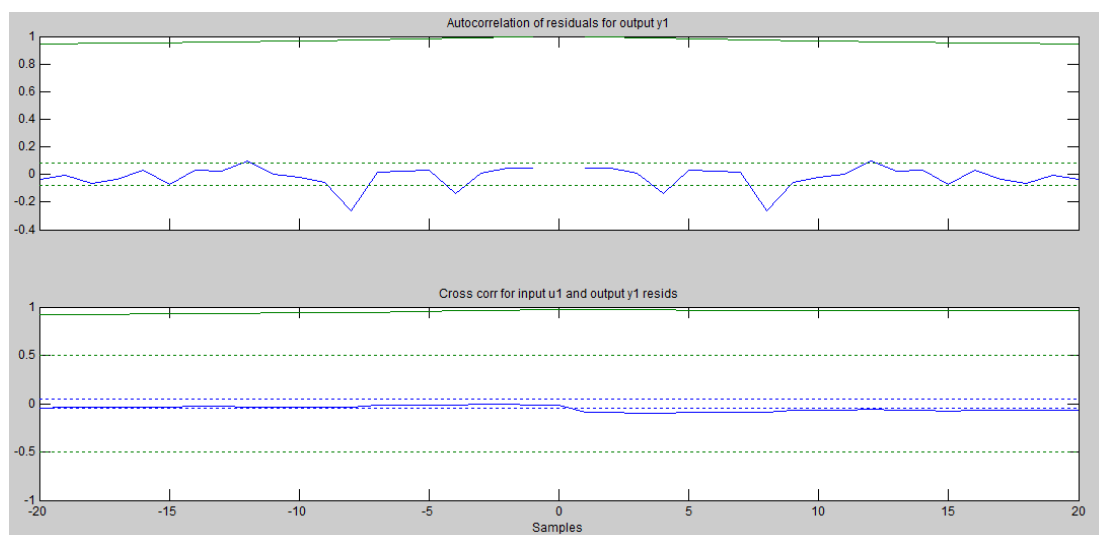


Рисунок 4.25 – Автокорреляция и взаимокорреляция двух параметров

Использование методов математического моделирования уже заявило о себе как о наилучшем агрегате для реализации технологических режимов и проектировании системы автоматизированного управления.

В начале исследования был проведен сбор данных с Балхашского медеплавильного завода. На основе полученных данных и был выбран канал расход подачи дутья кислорода – температура штейна, по которым проводилась обработка данных. Выбор канала обусловлен лучшей вероятностью построения передаточной функции. Сбор данных по обоим переменным проводились каждые 10 минут начиная с 12 часов ночи 1 числа июня. Диапазоном выбранных значений является месяц.

Следующим этапом после обработки данных является нахождение передаточной функции (Transfer Function Models), используя System Identification Toolbox (рисунок 4.26) в Matlab. System Identification Toolbox – это интерфейс, который имеет все необходимые инструменты для проектирования математиче-

ских моделей динамических систем, на основе наблюдаемых входных и выходных данных. Интерфейс прост в использовании для работы с моделями и данными. Методы идентификации, входящие в пакет, применимы для широкого класса задач, от проектирования систем управления и обработки сигналов, до анализа временных рядов.

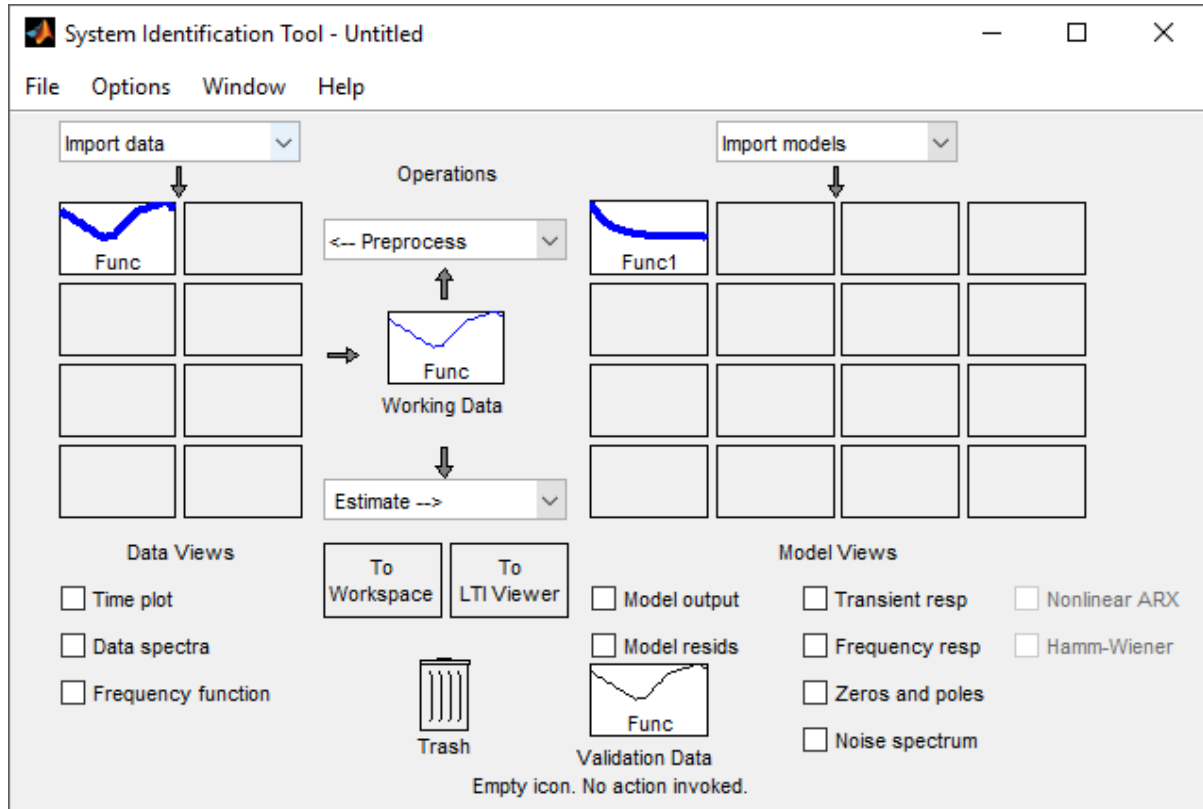


Рисунок 4.26 - Пакет для методов идентификации

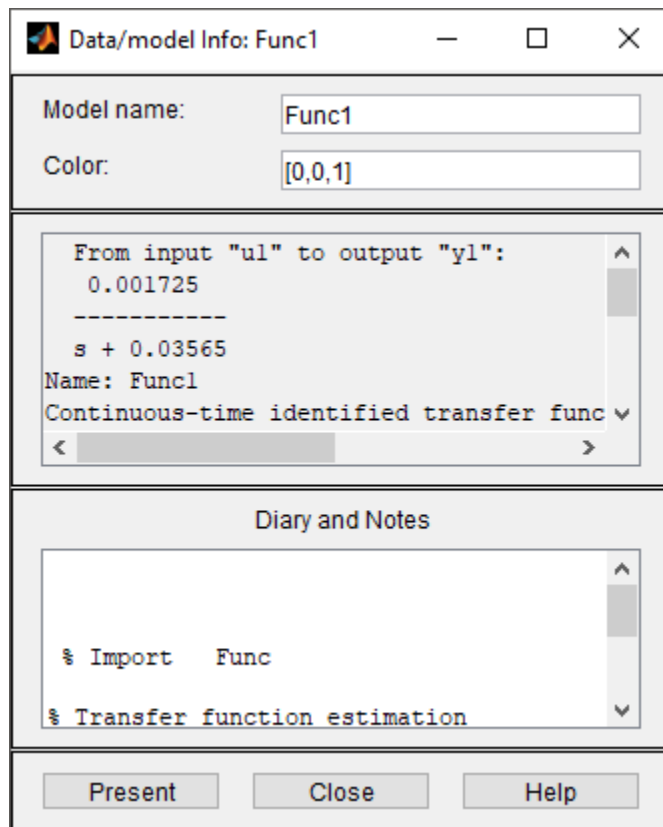


Рисунок 4.27 - Передаточная функция первого порядка

В результате с помощью данного интерфейса получена передаточная функция апериодического звена первого порядка.

$$W(p) = \frac{K}{Tp + 1} ,$$

где К – коэффициент усиления;
Т – постоянная времени.

$$W(p) = \frac{0.0476}{28p + 1}$$

Построение графиков реальной модели и построенных моделей (estimate models) необходимо для их сравнения.

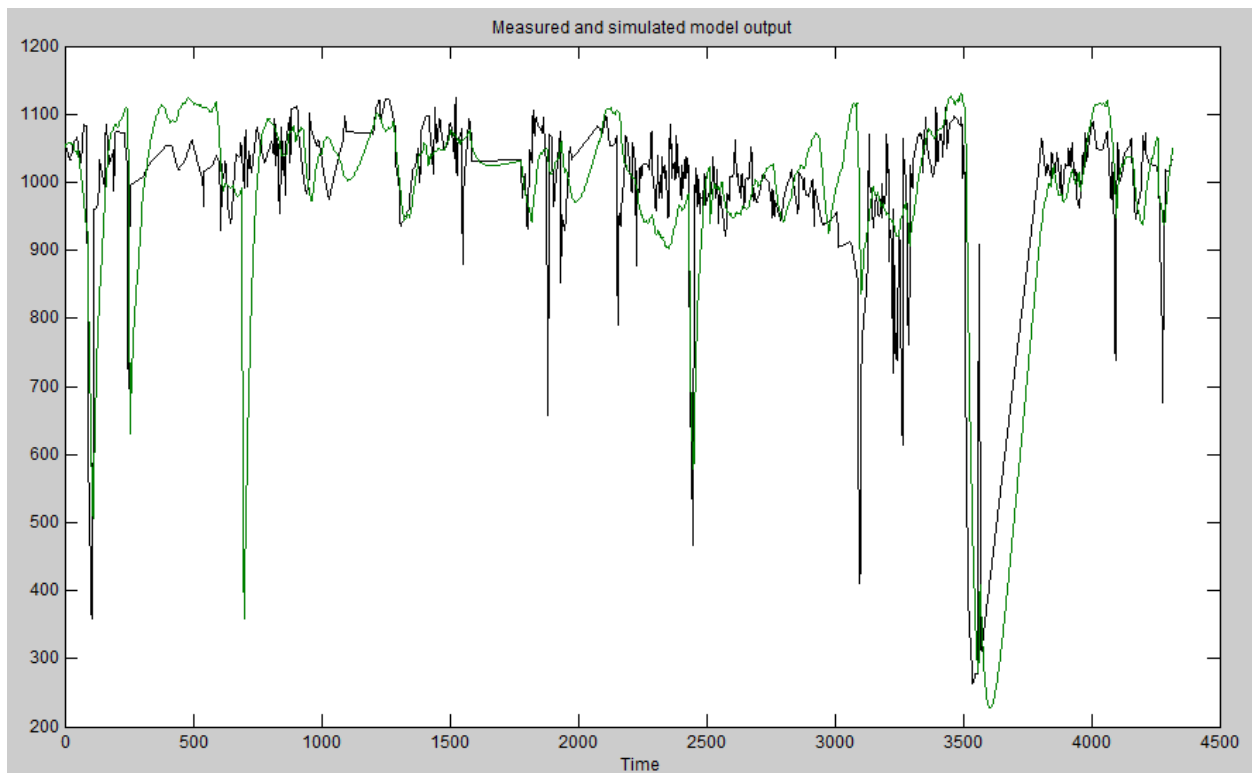


Рисунок 4.28 - Построенные модели в сравнении с реальной моделью

Полученная кривая разгона в результате исследования для данного канала представлена на рисунке:

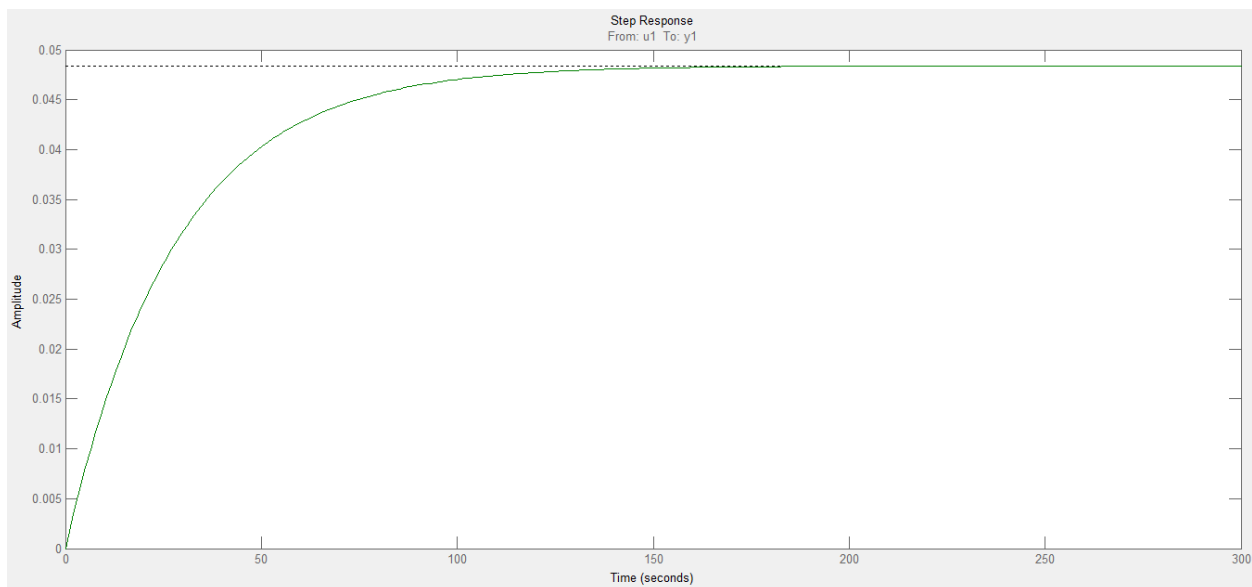


Рисунок 4.29 - Временной график построенной модели (единичный скачок)

Последующим этапом является моделирование математической модели. В данном случае была построена структурная схема с использованием ПИД-регулятора.

ПИД – регулятор представляет собой универсальный регулятор. Он также является простым П-регулятором с дополнительной интегральной составляющей и дифференциальной составляющей. Дополняющая И-составляющая необходима для устранения статической ошибки, которая характерна для пропорциональной составляющей регулятора. Достоинства ПИД-регулятора преобладают над ПИ регулятором, например, статическая ошибка регулирования почти равна нулю; достаточно прост в использовании, а точнее в настройке, т.к. настраиваются только два параметра, что обеспечивает управление с минимально возможной среднеквадратичной ошибкой регулирования; не чувствителен к шумам в канале измерения (в сравнении с ПИД-регулятором) и за счет дифференциальной составляющей обеспечивается быстроедействие системы. Передаточная функция:

$$W(p) = K_p + \frac{K_i}{p} + K_d p ,$$

где K_p – коэффициент пропорциональной составляющей;

K_i – коэффициент интегральной составляющей;

K_d – коэффициент дифференциальной составляющей.

Для управления процессом необходимо нахождение значения коэффициентов ПИД-регулятора. Данный шаг проводился с использованием приложения PID Tuner в Matlab. PID Tuner использует процесс PID tuning, который является процессом нахождения значений пропорционального, интегрального и дифференцированного коэффициентов в ПИД регуляторе для достижения необходимых характеристик переходного процесса. Обычно, PID контроллеры настраиваются либо вручную или используя определенные методы. С помощью PID Tuner можно автоматически в реальном времени настраивать PID контроллер, смотря на строящийся график. Далее интерфейс сам находит значения коэффициентов, основываясь на построенном графике.

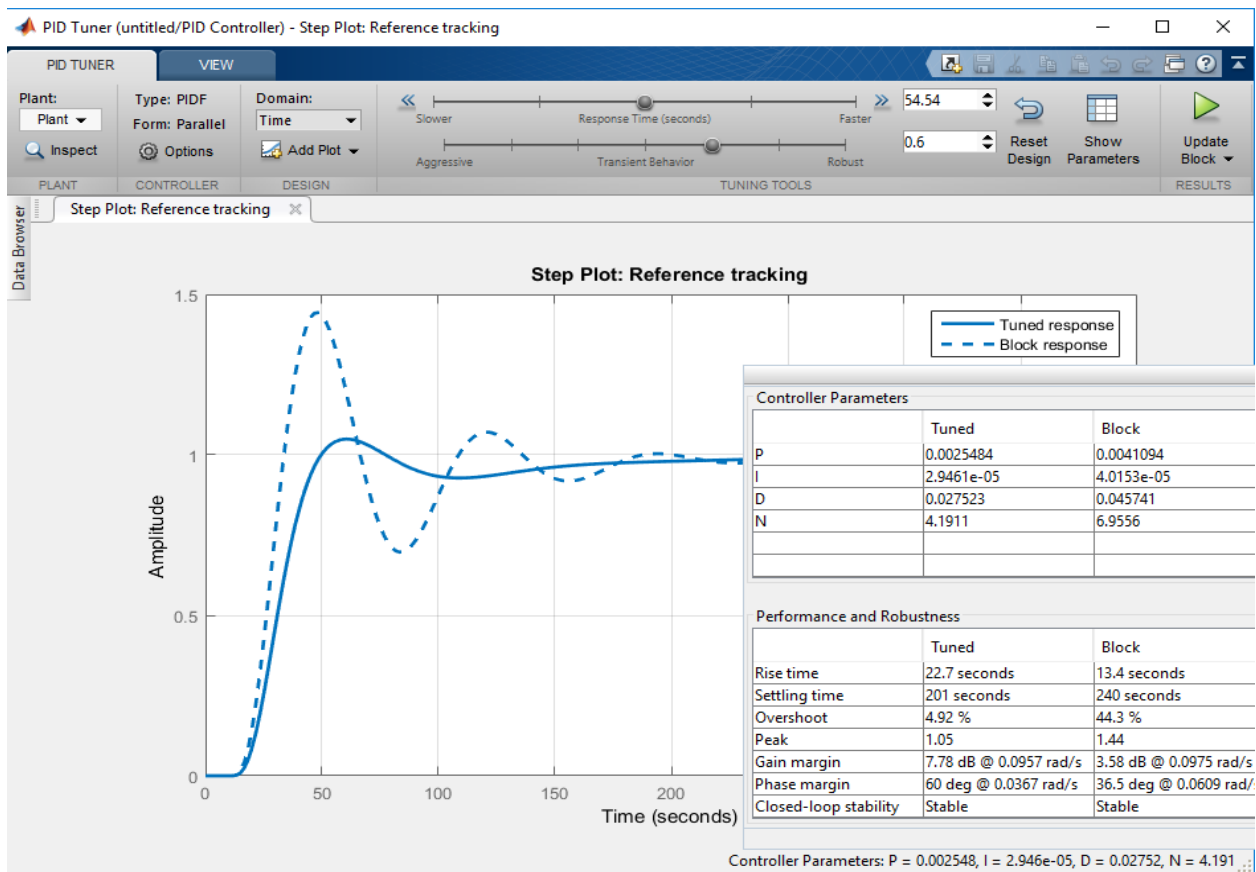


Рисунок 4.30 - Нахождение значений коэффициентов в PID Tuner

Как видно из рисунка, значения коэффициентов равны $K_p = 9.8$, $K_i = 1.2$.

Теперь необходимо смоделировать систему в Simulink. На рисунке представлена структурная схема САУ с ПИД-регулятором.

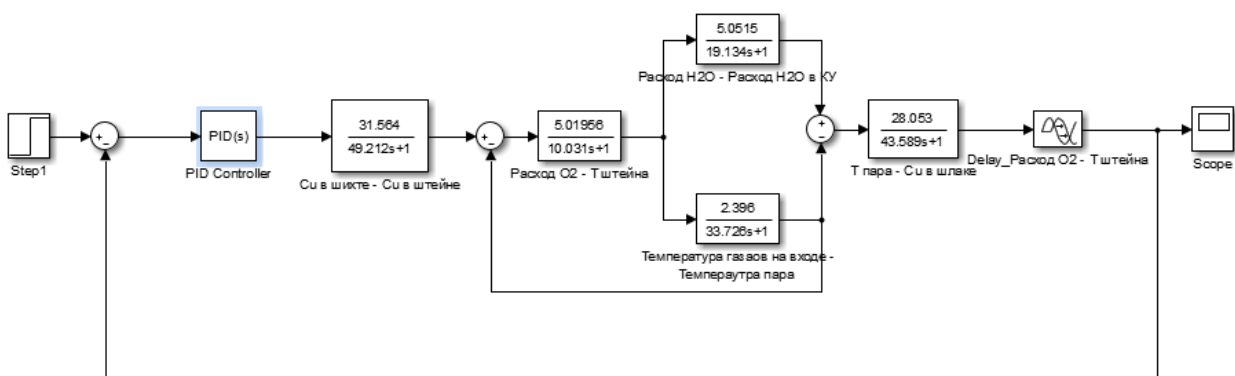


Рисунок 4.31 – Система управления ТК ПВ с ПИД-регулятором.

Однако, использование данного типа регулятора уже имеется в производстве, поэтому предлагается использовать Fuzzy-регулятор, основанный на теории нечеткой логики.

Обобщением классической теории множеств и классической формальной логики является математическая теория нечеткой логики (fuzzy logic). Основной причиной для появления новой теории стало наличие нечетких и приближенных рассуждений при описании человеком процессов, систем, объектов.

Fuzzy-регулятор представляет собой систему составленная из 3 блоков: фаззификатор, блок правил, дефаззификатор. На вход регулятора поступает ошибка e , используемая для вычисления производной по времени $\frac{de}{dt}$. Первым шагом подвергаются операции фаззификации обе величины (преобразования в нечёткие переменные). Далее полученные нечёткие переменные для получения управляющего воздействия на объект используются в блоке нечёткого логического вывода. Последним шагом является выполнение операции дефаззификации (обратного преобразования нечётких переменных в чёткие). После нее переменные поступают на выход регулятора в виде управляющего воздействия u .

Fuzzy-регулятор реализуется с помощью использования графического интерфейса пакета Fuzzy Logic Toolbox. Данный интерфейс предоставляет необходимые функции, приложения и блоки в Simulink для анализа, проектирования и симуляции систем, основанных на нечеткой логике. Данная программа предоставляет возможность для конструирования нечетких систем, используя разные методы, например, нечеткой кластеризации или нейронных сетей.

В нашем случае будет создан ПИД подобный регулятор, имеющий нечеткую систему Мамдани. Создается набор из двух входных составляющих, пропорциональной и интегрирующей, x_1 и x_2 соответственно, и один выходной u . Выбирается семь треугольных термов для описания каждой переменной. (NL, NM, NS, Z, PS, PM, PL).

Диапазоны входных переменных выбираются симметричные изменения, для x_1 $[-\frac{1}{K_p}; \frac{1}{K_p}]$, x_2 $[-\frac{1}{K_i}; \frac{1}{K_i}]$, где коэффициентами являются уже найденные в ПИД-регуляторе. Диапазон выходной переменной представлен в виде u $[0; C]$, где верхняя граница C выбирается самостоятельно для компенсации возмущения.

Для работы регулятора создается база правил. В первую очередь необходимо определить лингвистические правила и как раньше было написано у нас есть семь треугольных термов из которых уже создаются правила на основании системы Мамдани. Приведённые правила часто записывают в более компактной табличной форме. Используя правила, можно получить значение управляющей переменной u ~ на выходе нечёткого регулятора (таблица 4.1).

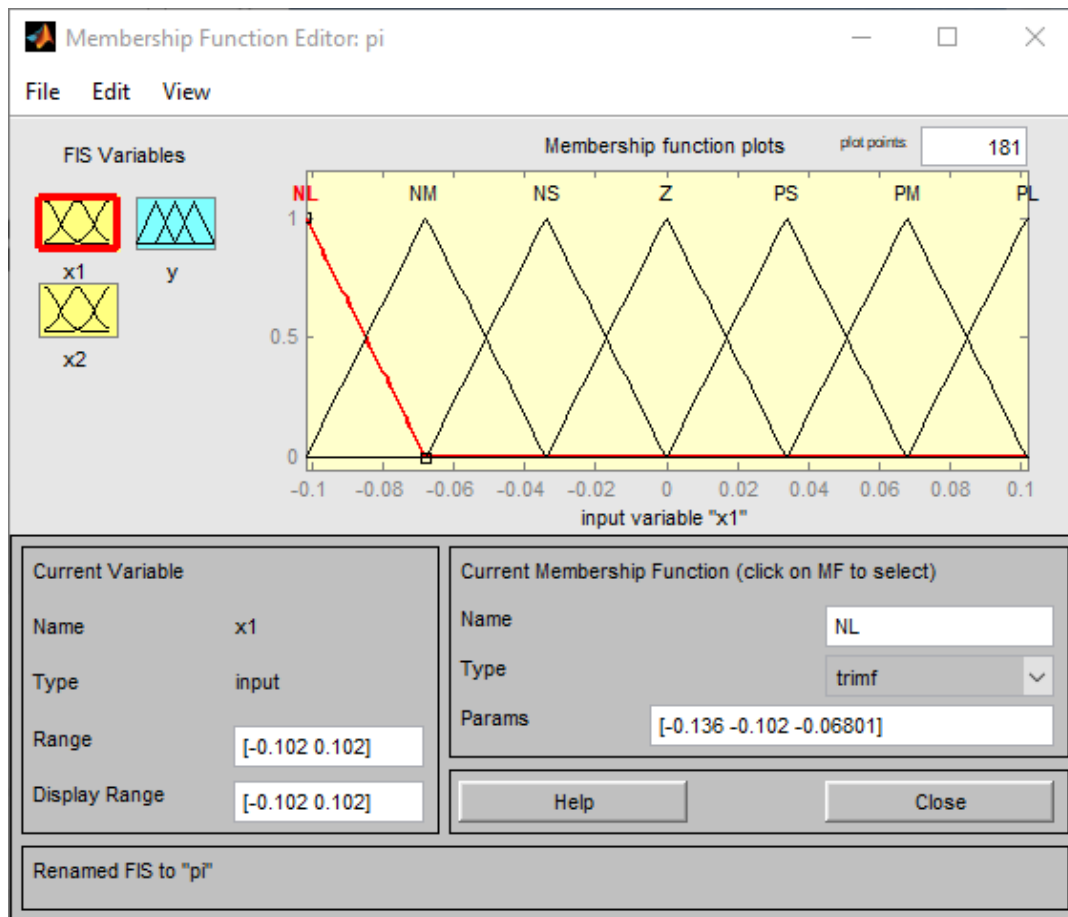


Рисунок 4.32 - Диалоговое окно редактора функций

Таблица 4.1 – Лингвистические правила Fuzzy регулятора

$\Delta \varepsilon \backslash \varepsilon$	NL	NM	NS	Z	PS	PM	PL
1	2	3	4	5	6	7	8
NL	NL	NL	NL	NM	Z	Z	Z
NM	NL	NL	NL	NM	Z	Z	Z
NS	NL	NL	NL	NM	Z	Z	Z
Z	NM	NM	NM	Z	PM	PM	PM
PS	Z	Z	Z	PM	PL	PL	PL
PM	Z	Z	Z	PM	PL	PL	PL
PL	Z	Z	Z	PM	PL	PL	PL

Правила формируются по типу: ЕСЛИ ... И ..., ТО ... Можно.

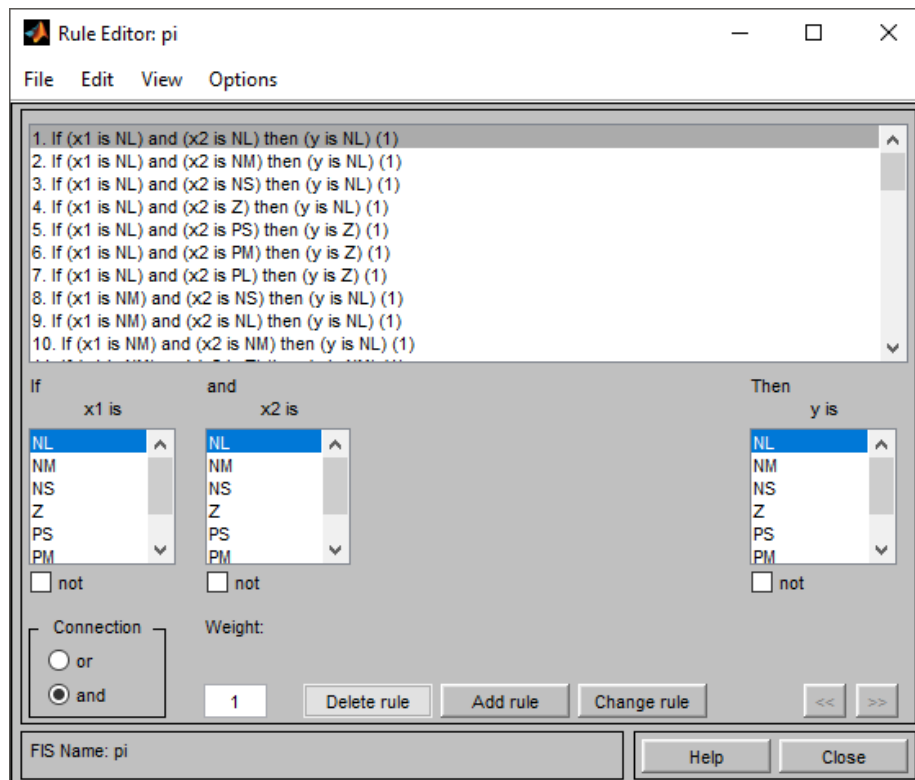


Рисунок 4.33 – Формирование баз правил в интерфейсе

Следующий шаг – это моделирование системы в Simulink.

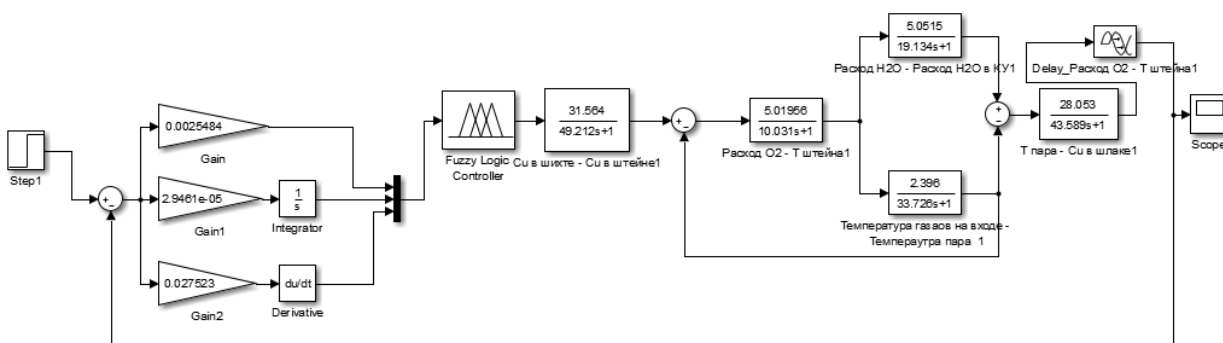


Рисунок 4.34 - Система управления ТК ПВ с использованием Fuzzy регулятора

Построим график переходных процессов для ПИД-регулятора и Fuzzy регулятора.

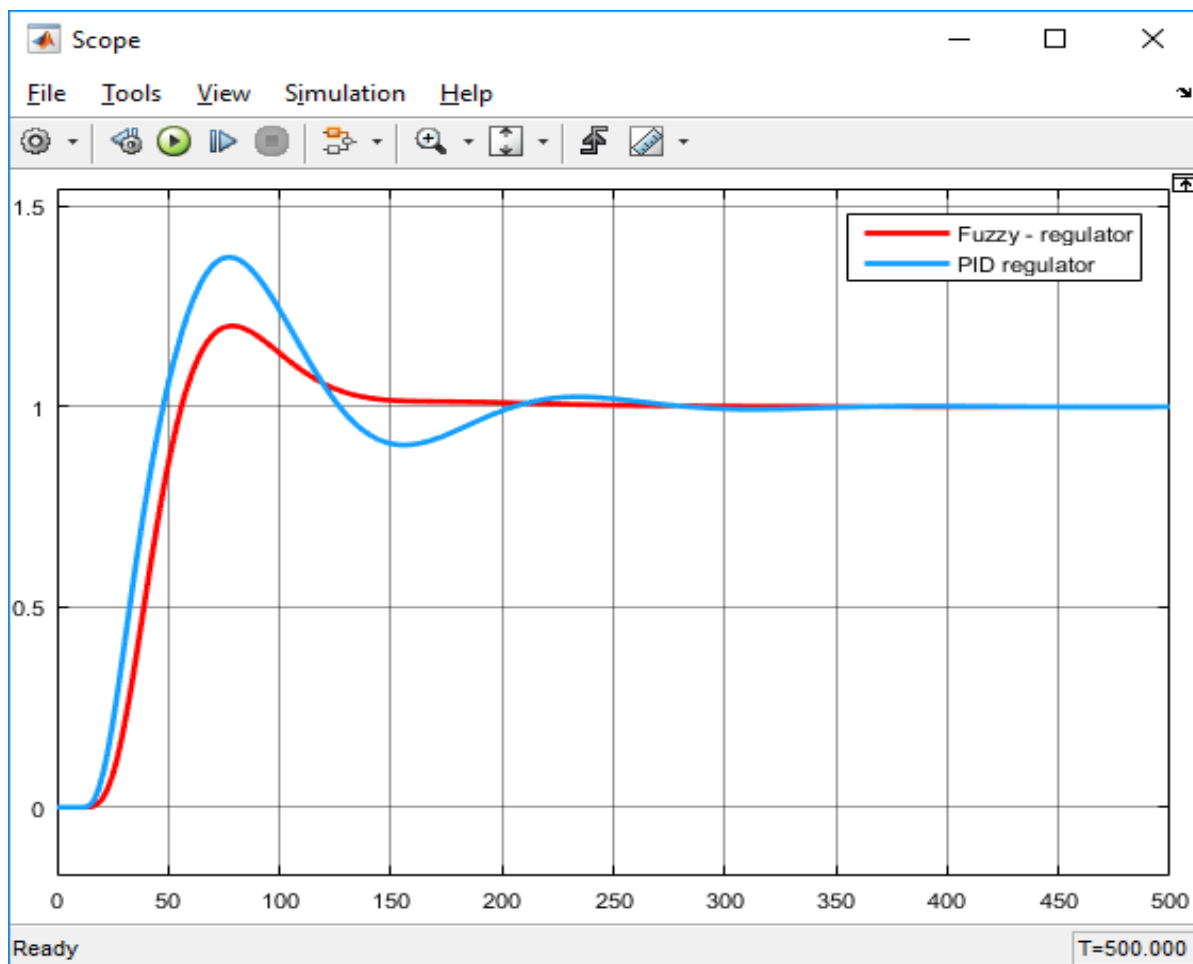


Рисунок 4.35 – Сравнение переходных процессов системы управления ТК ПВ с ПИД-регулятором и Fuzzy регулятором

Согласно графику (рисунок 4.35), время регулирования и динамическая ошибка у Fuzzy регулятора уменьшились и протекание процесса проходит без сильных колебаний, то есть нет резкого повышения температуры, примерно на 20 %.

Полученные с помощью пакета MATLAB System Identification Toolbox передаточные функции по наиболее важным каналам управления объекта представлены в таблице 4.2

Таблица 4.2 – Передаточные функции по каналам управления

№	Канал регулирования	Передаточная функция
1	Расход кислорода O_2 – Температура кессона	$W(s) = \frac{0.414}{s + 0.02032}$
2	Расход кислорода O_2 – процентное содержание Si в штейне	$W(s) = \frac{5004 * e^{-5}}{s + 0.009969} * e^{-76s}$
3	Расход воды в контурах – общий расход питательной воды на барабан КУ	$W(s) = \frac{0.02529}{s + 0.05043} * e^{-50s}$

4	Температура отходящих газов на входе в котел – давление пара в барабане	$W(s) = \frac{0.07169}{s + 0.01981}$
5	Температура отходящих газов на входе в котел – температура пара в барабане	$W(s) = \frac{0.07095}{s + 0.02965} * e^{-20s}$

Для наглядности процесса плавки Ванюкова в пакете MATLAB Simulink по каналам управления построены переходные процессы (см. рисунки 4.37-4.39).

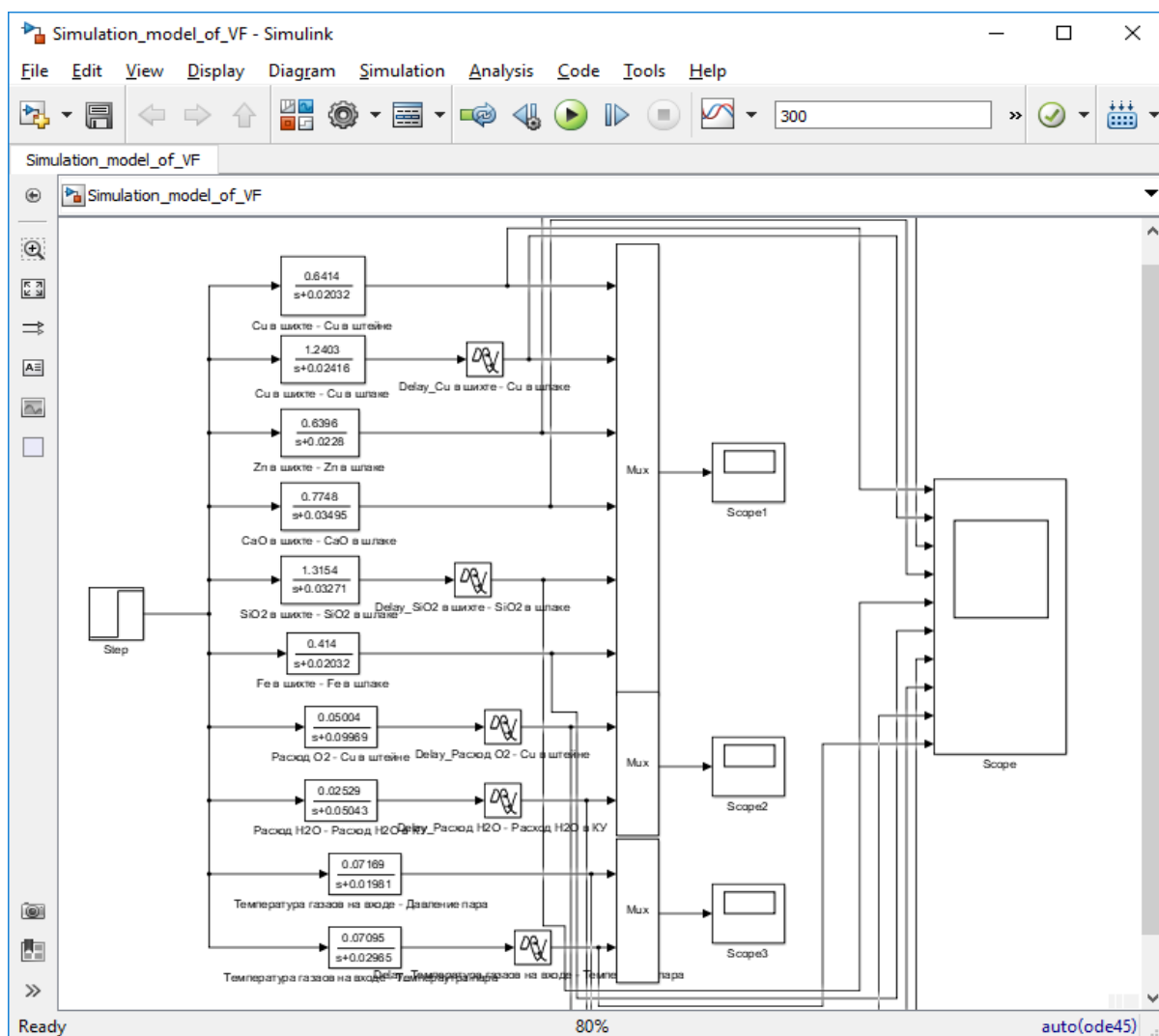


Рисунок 4.36 - Имитационная модель печи Ванюкова по каналам управления

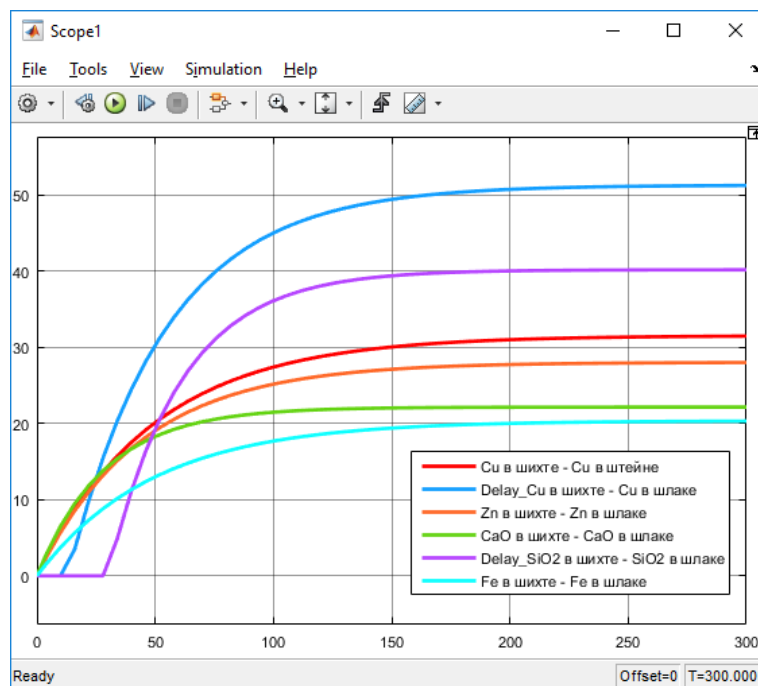


Рисунок 4.37 – Результаты моделирования по каналам «Содержание элементов в шихте – Содержание элементов в штейне, шлаке»

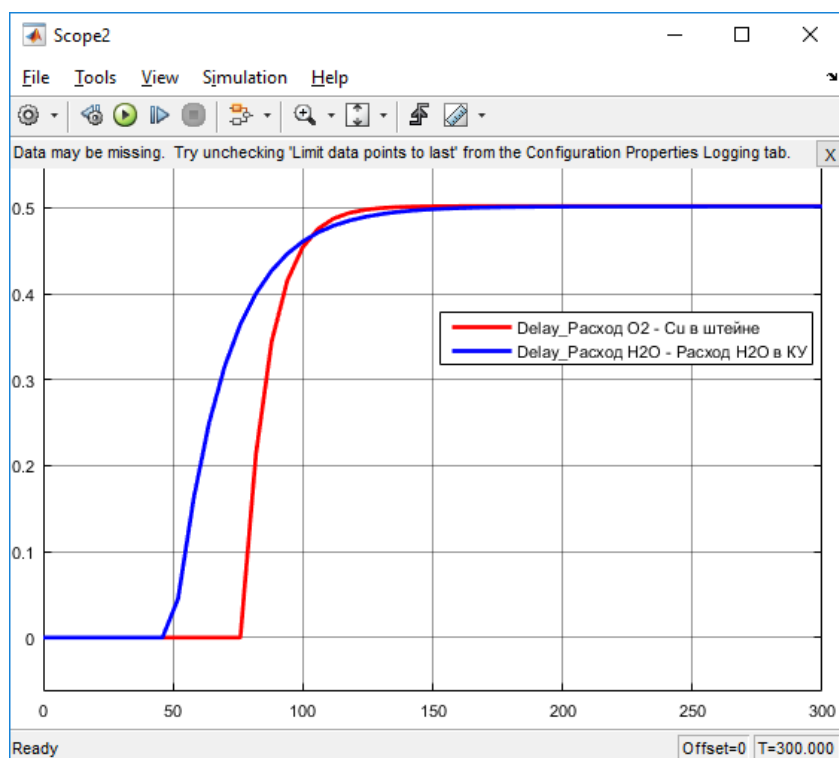


Рисунок 4.38 – Результаты моделирования по каналам «Расход – Содержание элементов в штейне» и «Расход воды в контурах – Общий расход воды в барабане котла-утилизатора»

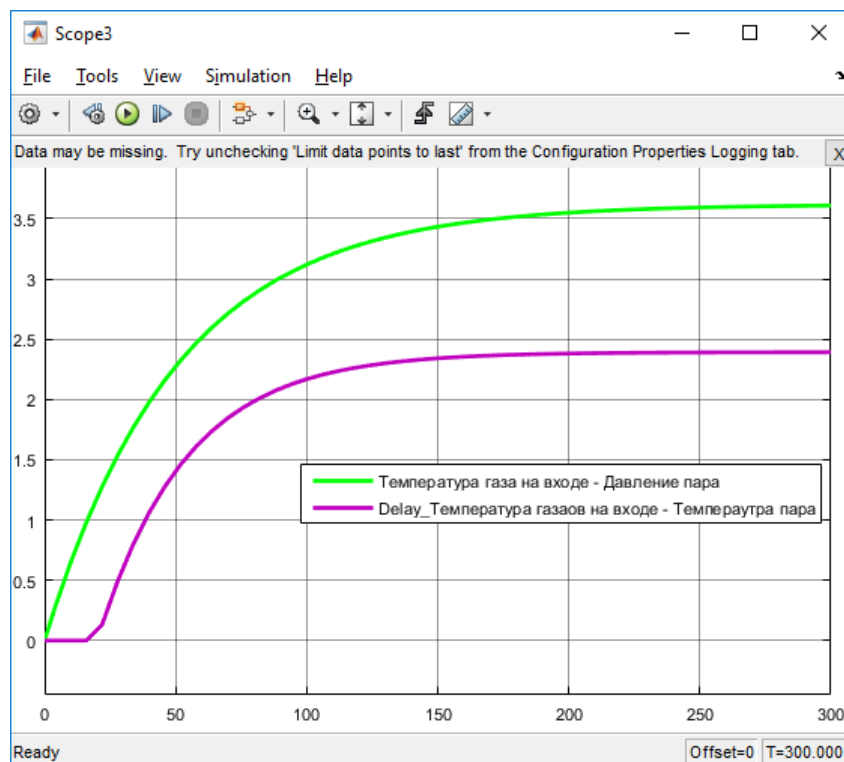


Рисунок 4.39 – Результаты моделирования по каналам «Температура газа на входе котла – Давление пара на выходе котла» и «Температура газа на входе котла – Температура пара на выходе котла»

4.3 Заключение по разделу

Из анализа и обработки данных в разделе можно сделать следующие основные выводы:

1. Использование методов математического моделирования позволяет эффективно реализовывать технологические режимы и проектировать системы автоматизированного управления, что подтверждается выбором канала расхода подачи дутья кислорода – температура штейна для обработки данных.

2. Проведенное моделирование по различным каналам, таким как «Температура газа на входе котла – Давление пара на выходе котла» и «Содержание элементов в шихте – Содержание элементов в штейне, шлаке», позволяет получить результаты, необходимые для анализа и оптимизации процессов.

3. Сбор данных на промышленном комплексе ПВ Балхашского медеплавильного завода и последующий анализ позволяют получить ценные статистические данные по входным и выходным параметрам, что является важным для контроля технологических процессов .

4. Таким образом, проведенный анализ данных и использование математического моделирования позволяют лучше понять процессы, происходящие на предприятии, и принимать обоснованные решения для оптимизации производственных процессов.

Результаты, изложенные в данном разделе, были опубликованы в научных статьях: [52], [53], [54], [55].

5 ИСПЫТАНИЕ И ПРОМЫШЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОТОТИПА МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫМ РЕЖИМОМ

5.1 Разработка системы контроля теплового режима в печи Ванюкова на основе экспериментального метода в программе Comsol Multiphysics

Для моделирования и построения математической модели в первую очередь понадобится исполнить физическую модель. Физическая модель представляет собой шамотный кирпич по ГОСТ 8691-73 [28]. Данный кирпич используется для постройки футеровки объекта исследования – печи Ванюкова в зоне аптейка. Футеровка предназначена для уменьшения тепловых потерь, и предохранения кожуха от воздействия высоких температур, а также и от контакта с жидким металлом и шлаком. На рисунке 5.1 представлена выполненная физическая модель.

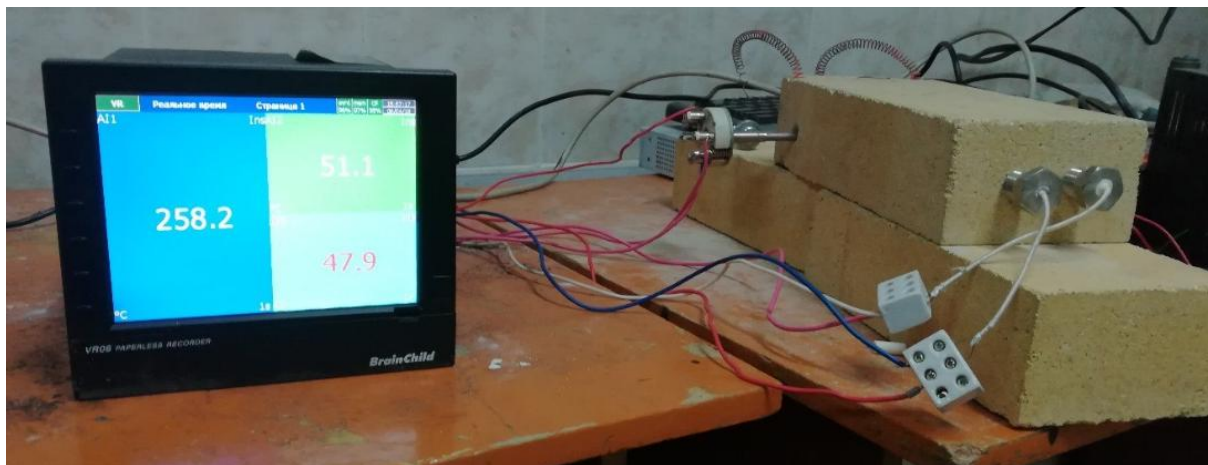


Рисунок 5.1 – Физическая модель

В данном кирпиче было просверлено 4 сквозных отверстий для того, чтобы установить источник джоулевого нагрева. Источником джоулевого нагрева служит нихромовая проволока. Проволока была скручена в пружину, так как от длины проволоки зависит ее сопротивление, благодаря которому она не сгорает при ее подключении к источнику переменного тока в 220 В. Так как измеренное сопротивление проволоки составляло 11 Ом, было принято решение снизить напряжение. Напряжение было понижено благодаря подключенному ЛАТР. ЛАТР – лабораторный автотрансформатор регулируемый. На нем напряжение было понижено до 46 В. Это было достаточно для того, чтобы проволока накалилась, но не сгорела. При этом было высчитана мощность нагрева $P = 192,4$ Вт.

Так же в шамотном кирпиче были сделаны 3 отверстия для внедрения в них технических средств, необходимых для измерения изменения температуры во время нагрева установки. Одно отверстие было сделано сбоку в 20 см от источника нагрева. Остальные два, чтобы оценить распределение температурного поля по всей поверхности шамотного кирпича, были сделаны с противополож-

ной стороны источника нагрева. Для того, чтобы снять и преобразовать показания измерения температуры нагрева, был подключен самописец. С помощью него снятые данные можно в архивированном состоянии передать на компьютер для дальнейшей их обработки.

На рисунке 5.2 представлена структурная схема физической модели.

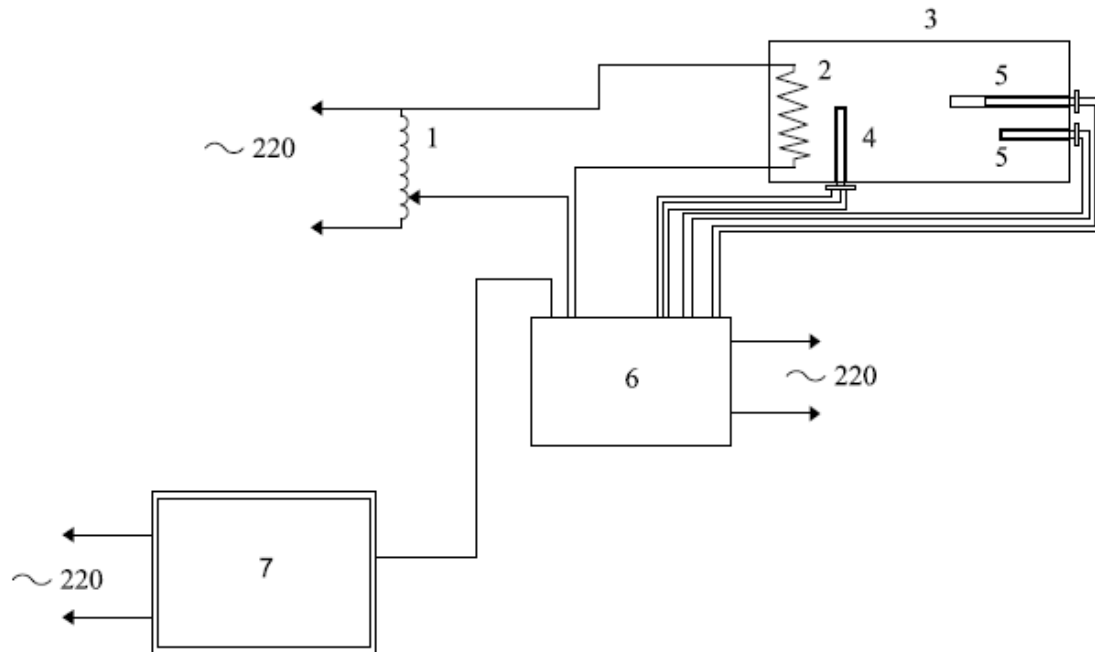


Рисунок 5.2 – Структурная схема физической модели

Обозначения на рисунке 5.2:

- 1 – ЛАТР;
- 2 – нихромовая проволока;
- 3 – шамотный кирпич;
- 4 – термосопротивление TC Rosemount 0065;
- 5 – термопары ТП-2488/1- 2 штуки;
- 6 – самописец VR06 Brainchild;
- 7 – ноутбук DELL.

5.2 Математическое описание теплового режима в печи Ванюкова

В ходе проведения эксперимента было выявлено, что распределение температурного поля изменяется во времени, то есть выступает в качестве функции времени. Следовательно, тепловые процессы в таких условиях являются нестационарными. Нестационарность тепловых процессов обусловлена изменением энтальпии тела и связана с его процессами нагрева и охлаждения. Поскольку скорость изменения энтальпии прямо пропорциональна теплопроводности материала (коэффициент λ) и обратно пропорциональна его теплоемкости (объемной теплоемкости $\rho \cdot c$), общая скорость теплового режима определяется значением коэффициента температуропроводности $a = \lambda / (\rho \cdot c)$. Этот коэффициент играет

такую же важную роль, как и коэффициент теплопроводности в условиях стационарного распространения тепла [38].

Для решения задачи анализа нестационарной теплопроводности необходимо определить зависимости изменения температуры и количества переданной теплоты во времени в любой точке тела. Такие зависимости могут быть получены посредством решения дифференциального уравнения теплопроводности.

Далее, формулируем дифференциальное уравнение теплопроводности. Его вывод основан на законе сохранения энергии: объем теплоты dQ , поступившей в элементарный объем dv за время $d\tau$ вследствие теплопередачи, равен изменению внутренней энергии dU , накопленной в данном объеме за тот же промежуток времени [39].

$$dQ = dU. \quad (5.1)$$

Обозначим у кирпича стороны dx , dy , dz , параллельные соответствующим координатным осям (рисунок 5.3). Объем равен $dv = dxdydz$.

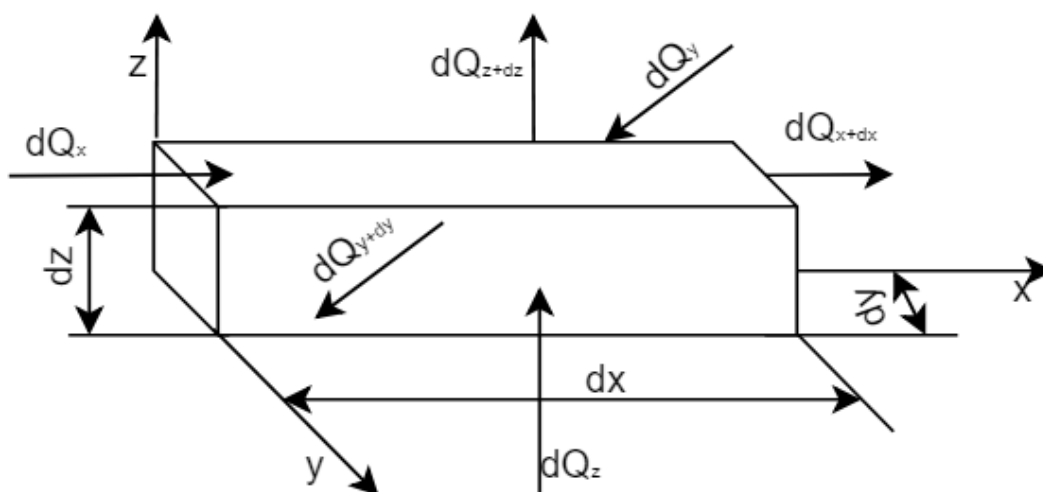


Рисунок 5.3 – Выведение дифференциального уравнения теплопроводности

Количество тепловой энергии, подводимой к элементарной грани параллелепипеда в направлении оси Ox за интервал времени $d\tau$, определяется выражением $dQ_x = q_x dydzd\tau$, где q_x – проекция плотности теплового потока на нормаль к указанной грани. Аналогичным образом, количество энергии, отводимой через противоположную грань в направлении оси Ox , составляет $dQ_{x+dx} = q_{x+dx} dydzd\tau$. Следовательно, разница между количеством теплоты, поступившей к элементарному объему и отведенной от него за временной промежуток $d\tau$, может быть записана как разность этих двух выражений:

$$dQ = dQ_x - dQ_{x+dx} = q_x dydzd\tau - q_{x+dx} dydzd\tau. \quad (5.2)$$

Функция q_{x+dx} , определенная на рассматриваемом интервале dx , обладает свойством непрерывности. При разложении этой функции в ряд Тейлора и ограничении суммы первыми двумя членами получаем приближенное выражение $q_{x+dx} \approx q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx$, позволяющее аппроксимировать значение q_{x+dx} в локальной области.

Тогда из равенства (5.2) получим:

$$dQ = - \frac{\partial q_x}{\partial x} dv d\tau. \quad (5.3)$$

Если рассматривать внутреннюю энергию единицы объема тела $U=U(t, v)$, то:

$$dU = C_v \frac{\partial t}{\partial \tau} dv d\tau = c_v \rho \frac{\partial t}{\partial \tau} dv d\tau, \quad (5.4)$$

где C_v – изохорная теплоемкость единицы объема, выражаемая в Джоулях на кубический метр на Кельвин ($\text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$);

c_v – удельная теплоемкость вещества при постоянном объеме, измеряемая в Джоулях на килограмм на Кельвин ($\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$);

а ρ – плотность исследуемого вещества.

После подстановки выражений (5.3) и (5.4) в уравнение (5.2) получаем:

$$c_v \rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = - \frac{\partial q_x}{\partial x}. \quad (5.5)$$

При использовании закона Фурье для стационарной теплопроводности, в соответствии с которым тепловой поток qx определяется как $q_x = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x}$, имеем:

$$c_v \rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = - \frac{\partial}{\partial x} \left(-\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right)$$

что приводит к следующему выражению:

$$c_v \rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = - \lambda \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \quad (5.6)$$

Данное уравнение является дифференциальным уравнением нестационарной теплопроводности для одномерного распространения теплоэнергии в теле.

Обозначив отношение $\frac{\lambda}{c_v \rho} = a$, получим выражение в следующей форме:

Обозначив, Получим это уравнение в виде:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \quad (5.7)$$

Для решения данного уравнения будет использоваться универсальная программная платформа для моделирования и компьютерного моделирования физических задач – COMSOL Multiphysics.

5.3 Выбор программного обеспечения для реализации модели

На сегодняшний день метод конечных элементов является широко распространённым численным подходом, который активно применяется исследователями и инженерами для анализа различных физических процессов и явлений, происходящих в окружающем мире. Численное моделирование нередко может служить альтернативой натурным экспериментам, особенно в случаях, когда проведение испытаний затруднено из-за отсутствия необходимой экспериментальной базы или средств для их реализации.

Данный метод реализован в большом множестве программных комплексов, как отечественного, так и импортного производства, включая системы автоматизированного проектирования (САПР), CAD/CAM продукты и специализированные программные решения. Всемирно известные интерфейсы, такие как ANSYS, ADINA, Abaqus и Comsol Multiphysics, позволяют решать широкий спектр задач методом конечных элементов. Современные версии данных комплексов отличаются высокой удобностью для пользователя и простотой освоения, что облегчает выполнение расчетов различных процессов. В то же время, не все возможности программ могут быть реализованы через графический интерфейс; для программирования пользовательских функций в этих системах предусмотрены встроенные языки, с помощью которых можно создавать собственные модули, макросы и расширения [40].

Несмотря на разнообразие программных продуктов, объединяет их общий фундамент – использование метода конечных элементов как основной метод анализа. Однако каждый из программных комплексов обладает своими особенностями, а моделирование в них реализуется по определенному сценарию. В таблице 5.1 приведено сравнение основных характеристик наиболее популярных систем: Femm, Jmag Designer и Comsol Multiphysics.

Таблица 5.1 – Сравнительный анализ характеристик программ для моделирования физических процессов

Название программы	Comsol Multiphysics	Femm	Jmag Designer
--------------------	---------------------	------	---------------

Поддерживаемые операционные системы	Windows, Mac, Linux, UNIX	Windows	Windows, Mac, Linux, UNIX
Встроенный язык программирования	Не имеется	Имеется свой язык	Не имеется
Связь с программами, MATLAB, AutoCAD и др.	Есть	Есть	Не имеется
Решение тепловых задач	Имеется данная функция	Имеется данная функция	Имеется данная функция
Встроенный CAD – редактор	Присутствует свой редактор	Не имеет своего редактора	Присутствует свой редактор
Возможность моделирования в 2D формате	Есть	Есть	Есть
Возможность моделирования в 3D формате	Имеется	Нет данной возможности	Данная возможность есть только для тепловых задач

Для моделирования был выбран Comsol Multiphysics, так как имеет более понятный интерфейс, а также подходит всем нужным требованиям, т.е. имеется возможность моделирования теплопередачи в 3D формате. Помимо решения тепловых задач в Comsol Multiphysics можно решать различные физические задачи. Для данного программного обеспечения имеется много обучающего материала, что позволяет быстрее освоить интерфейс и различные возможности программы [41].

5.3.1 Моделирование теплопередачи в физической модели

В данном подразделе описывается процесс моделирования и анализ результатов в Comsol Multiphysics.

Была выбрана модель Heat Transfer in Solids, которая описывает теплопередачи в твердых телах, используемая для моделирования теплопроводности, конвекции и излучения (рисунок 5.4). Уравнение температуры, определенное в твердых областях, соответствует дифференциальной форме закона Фурье, которая может содержать дополнительные функции, такие как источники тепла [42].

Помимо теплофизических процессов, имеются электромагнитные физические процессы, химические процессы, акустические и т.д. Так же можно вводить пользовательские дифференциальные уравнения. Для этого нужно выбрать «Global ODEs and DAEs (ge)», где можно с помощью коэффициентов задавать

уравнениям необходимый вид. Для решения обратных задач пользователь должен выбрать раздел «Optimization». Данный раздел предназначен для решения обратных задач при помощи метода конечных элементов [41].

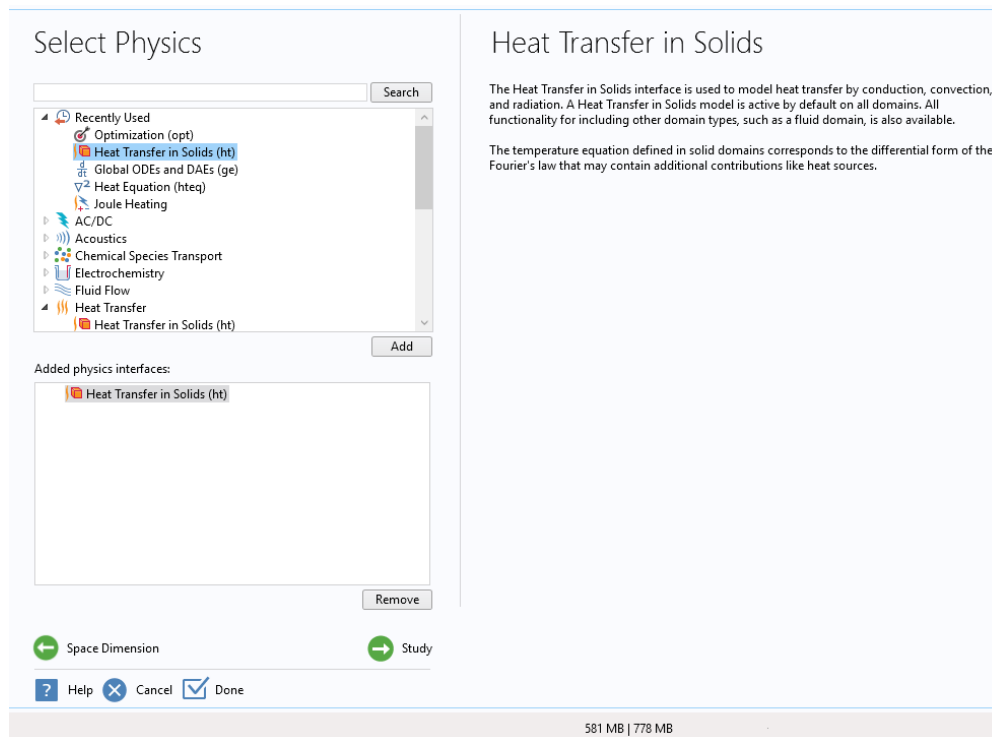


Рисунок 5.4 – Выбор физически процессов, протекающих в модели

Выбрав физический процесс, далее нужно выбрать решатель. Стационарный или динамический. Выбираем динамический, так как моделирование будет производиться с заданным интервалом времени (рисунок 5.5). Так же есть решатель «Empty Study», который в будущем позволяет работать как с динамическим, так и со стационарным решателем.

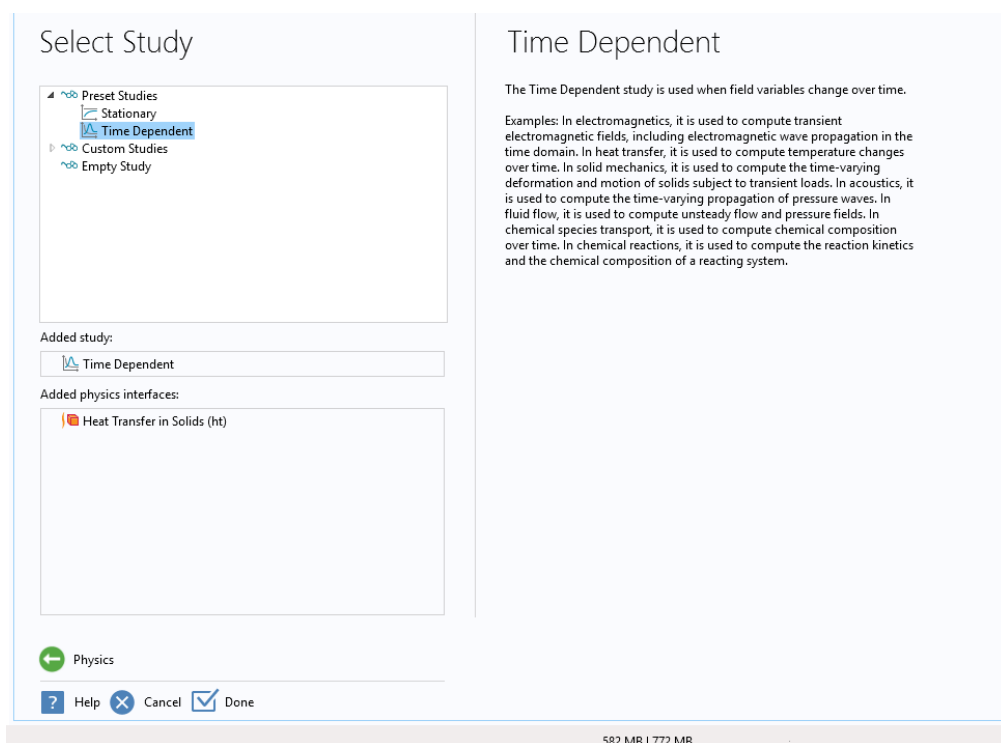


Рисунок 5.5 – Выбор решателя

Далее на экране возникает конструктор моделей – «Model Builder» (рисунок 5.6).

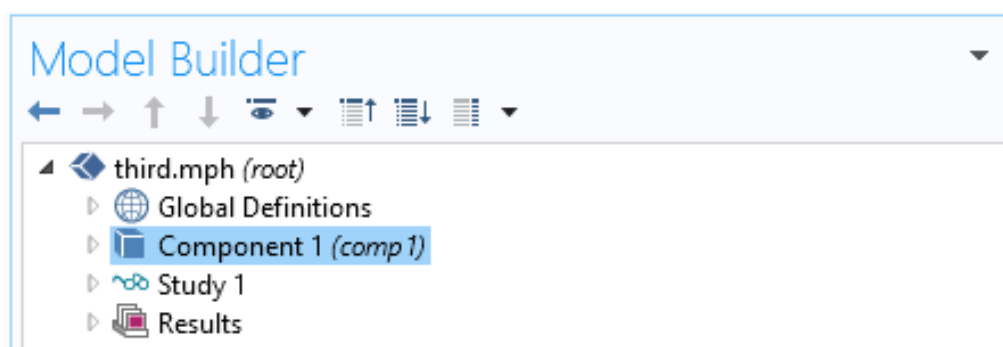


Рисунок 5.6 – Конструктор моделей

В процессе управления процедурой моделирования осуществляется использование конструктора моделей, называемого «Model Builder». Данный инструмент представляет собой древовидную структуру объектов, включающую всю необходимую функциональность и операции для формирования физических или математических моделей, проведения численных расчетов, анализа результатов или визуализации их отображения. В качестве базовых элементов конструктора моделей выступают [41]:

1. «Global Definitions» - предназначен для задания глобальных переменных, параметров, функций и иных элементов, которые могут быть использованы на протяжении всей модели независимо от ее элементов;

2. «Component» - служит для создания основной части модели, включающей определения геометрии, материалов, разбиения на конечные элементы, шаблонов моделей и иных аспектов. В пределах одного файла допускается создание нескольких моделей;

3. «Study» - предназначен для настройки параметров итерационных процессов, конфигурации решателей и других параметров моделирования;

4. «Results» - используется для представления, интерпретации и анализа полученных результатов.

Для начала проведения исследования необходимо загрузить объект моделирования в раздел «Geometry», который находится в окне «Component».

Модель кирпича была импортирована с AutoCAD, где была предварительно построена (рисунок 5.7).

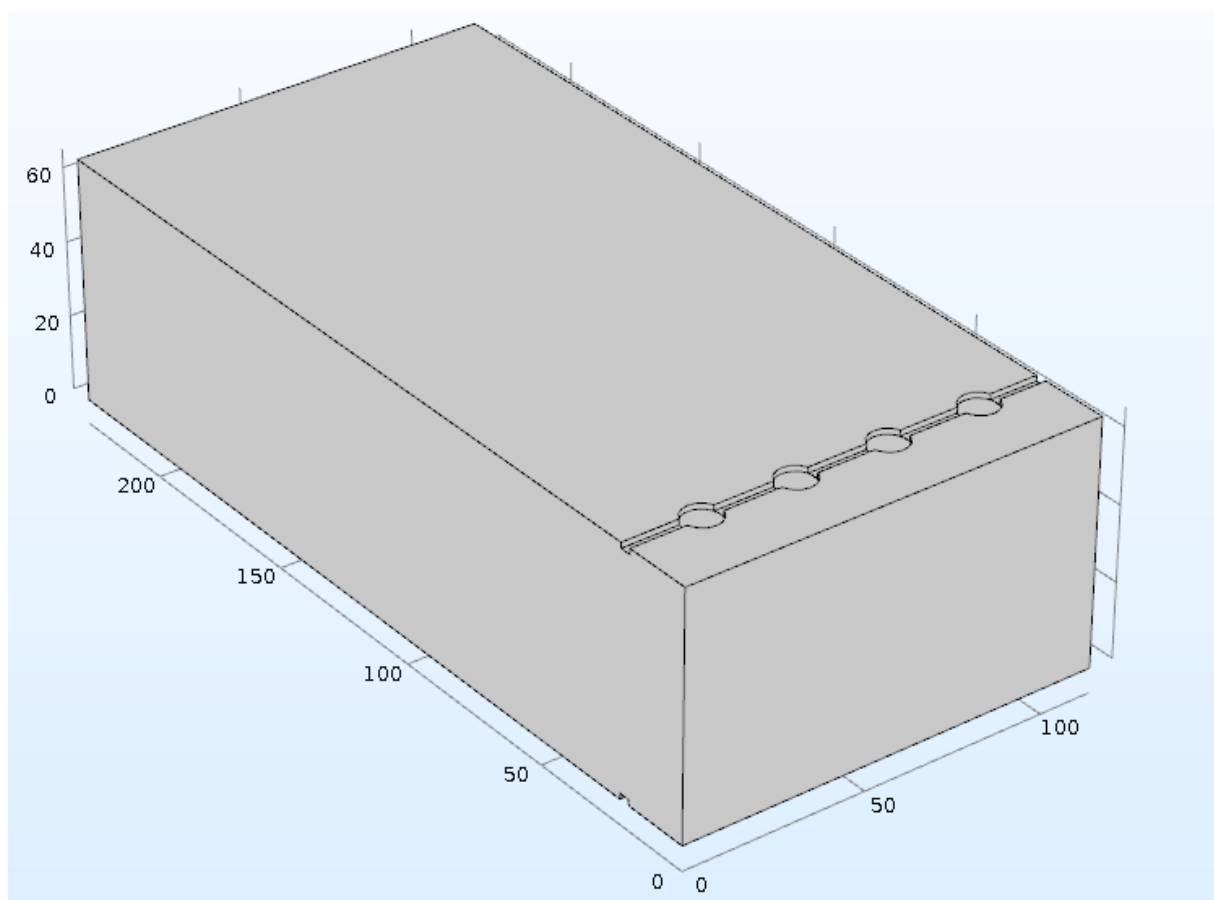


Рисунок 5.7 – Графическое представление модели

Размеры кирпича $230 \times 114 \times 65$ (мм). Далее в разделе «Materials» был выбран материал, из которого изготовлен кирпич, т.е. шамот. Так как данный материал отсутствовал, необходимые параметры были заданы вручную (рисунки 5.8-5.10). Для задания материала в отверстиях были прорисованы цилиндры, так как встроенный CAD-решатель не распознает полые отверстия. Для них из библиотеки материалов был выбран воздух.

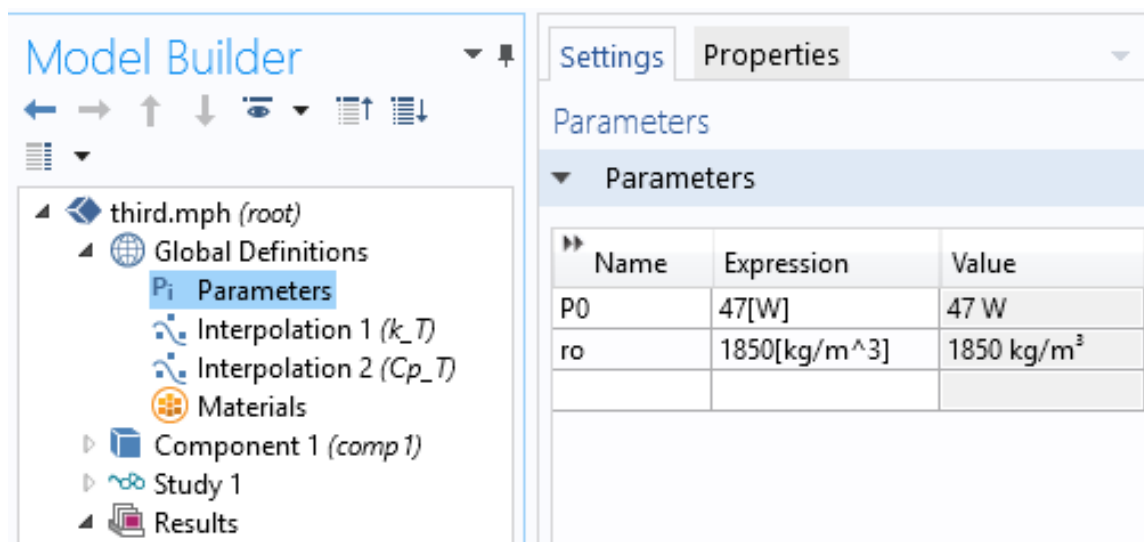


Рисунок 5.8 – Основные параметры

На рисунке 5.10 заданы основные параметры, требуемые для расчета, а именно $P_0 = 47$ Вт, является мощностью источника нагрева. Так как их 4, то соответственно $P = 192$ Вт. Так же указана плотность вещества (шамота) - $\rho_0 = 1850$ кг/м³.

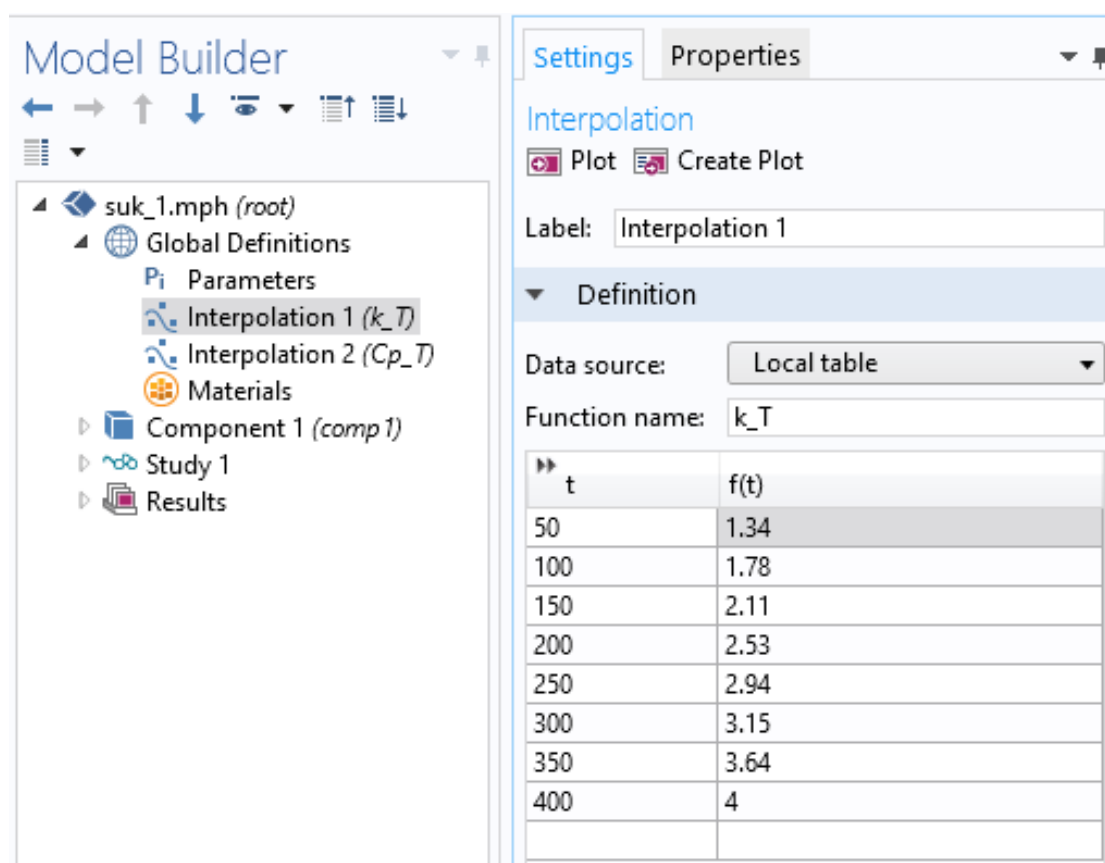


Рисунок 5.9 – Основные параметры

На рисунке 5.9 задана функция коэффициента теплопроводности от температуры в °C.

Так как все расчеты в Comsol ведутся в Кельвинах, все параметры задаются в этой же размерности.

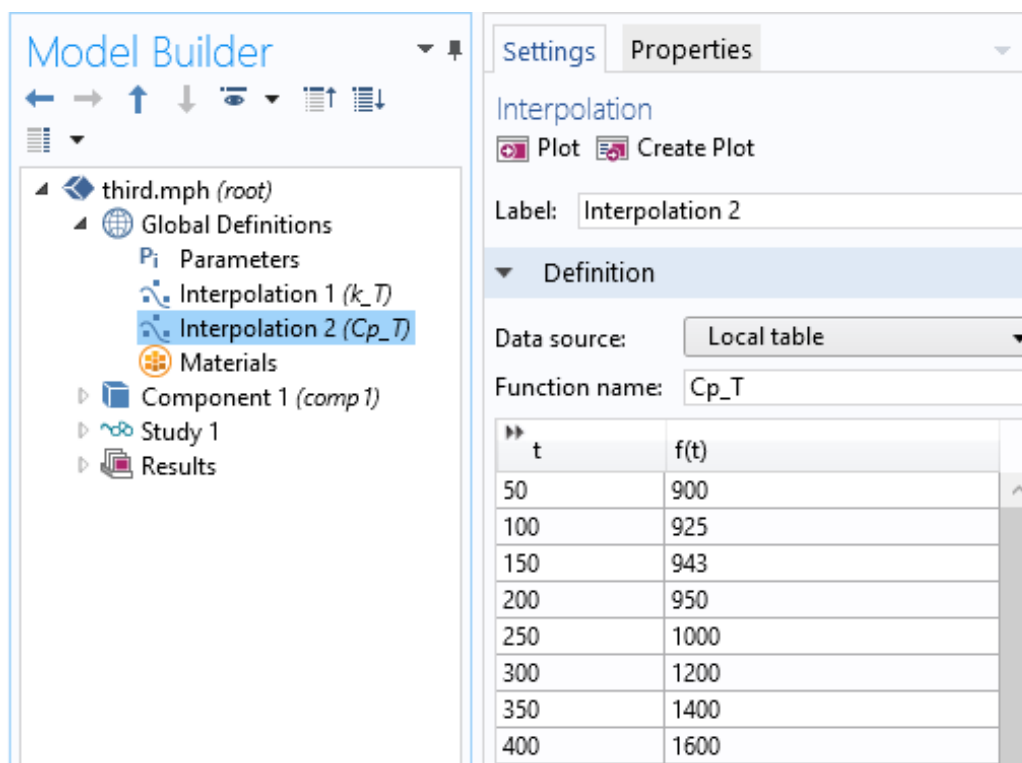


Рисунок 5.10 – Основные параметры

На рисунке 5.10 задана функция теплоемкости вещества от температуры в °C.

Далее в узле «Heat Transfer in Solids» нужно задать начальные и граничные условия, а также параметры необходимые для расчета. На рисунках 5.11-5.12 были заданы коэффициент теплопроводности, теплоемкость, плотность вещества и начальная температура равная 20 °C.

Для того чтобы ввести функцию в Comsol, требуется через контекстное меню, добавить узел «Interpolation» [42]. Где в первом столбце, задается переменная, от которой зависит функция, а во втором столбце задается сама функция.

Коэффициент теплоемкости брался для шамотного кирпича. При увеличении температуры коэффициент теплоемкости возрастает, т.е. он прямо пропорционально зависит от температуры нагрева [38].

Для вычисления коэффициента температуропроводности требуется внести данные для коэффициента теплопередачи, коэффициента теплоемкости и плотность вещества. Все это влияет на нагрев тела.

Все вышеперечисленные функции и параметры задавались в узле «Global Definitions», так как они будут использоваться для всех моделей и решателей вне зависимости от их количества и свойств.

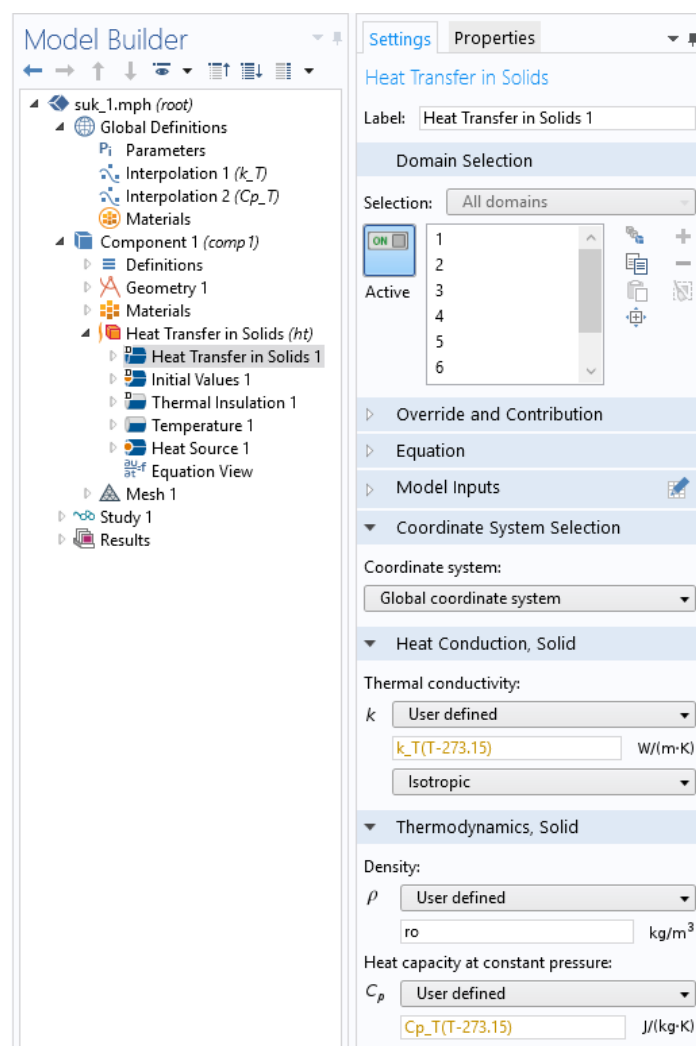


Рисунок 5.11 – Задание начальных условий

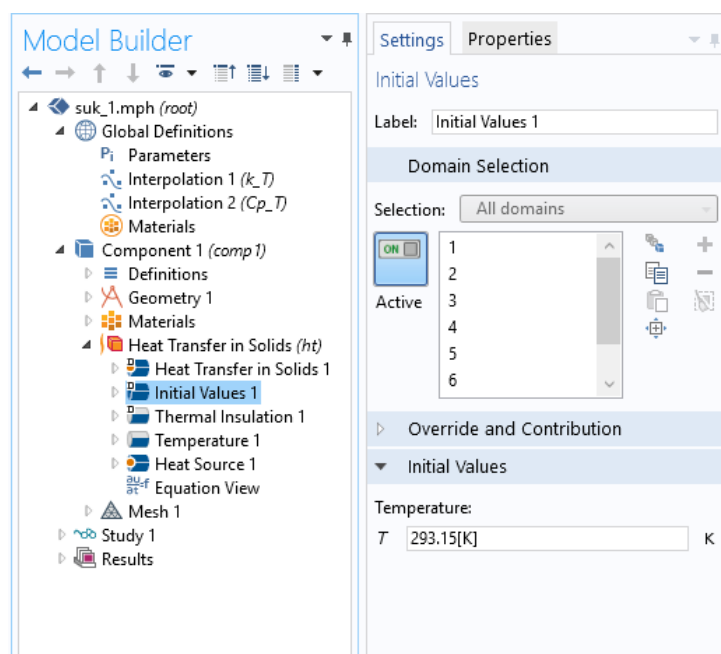


Рисунок 5.12 – Задание начальной температуры

На рисунке 5.12 была введена температура для поверхности всего кирпича 293 К или 20 °С.

В задании граничных условий по умолчанию вся поверхность модели теплоизолированная, потребуется переопределить эти условия. Для того, чтобы задать граничное условие через контекстное меню, был добавлен узел «Temperature». В данном узле была выбрана поверхность кирпича, противоположная источнику нагрева (рисунок 5.13).

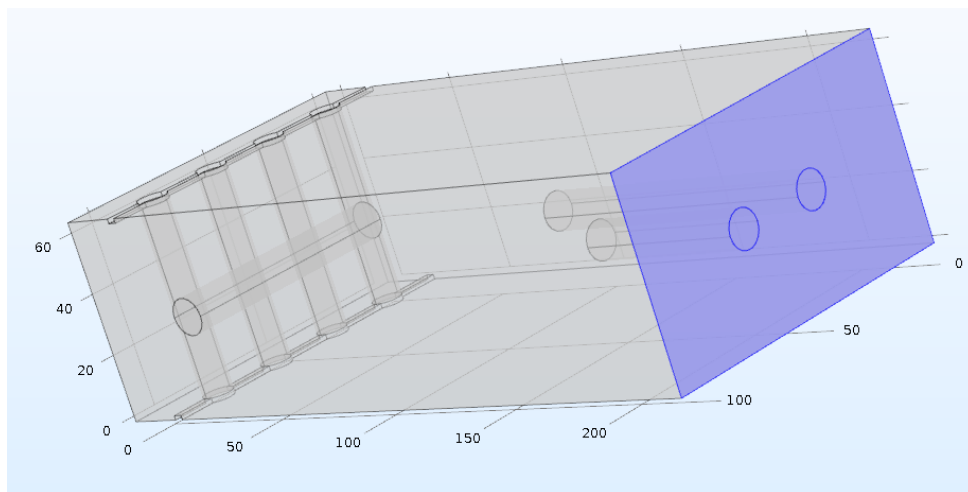


Рисунок 5.13 – Определение граничных условий

Подразумевается, что кирпич будет находиться в футеровке печи. Поэтому только одна его часть будет не теплоизолированная. Исходя из этих соображений, были выбраны граничные условия.

Так же был задан источник джоулевого нагрева во вкладке «Heat Source» (рисунки 5.14 – 5.15)

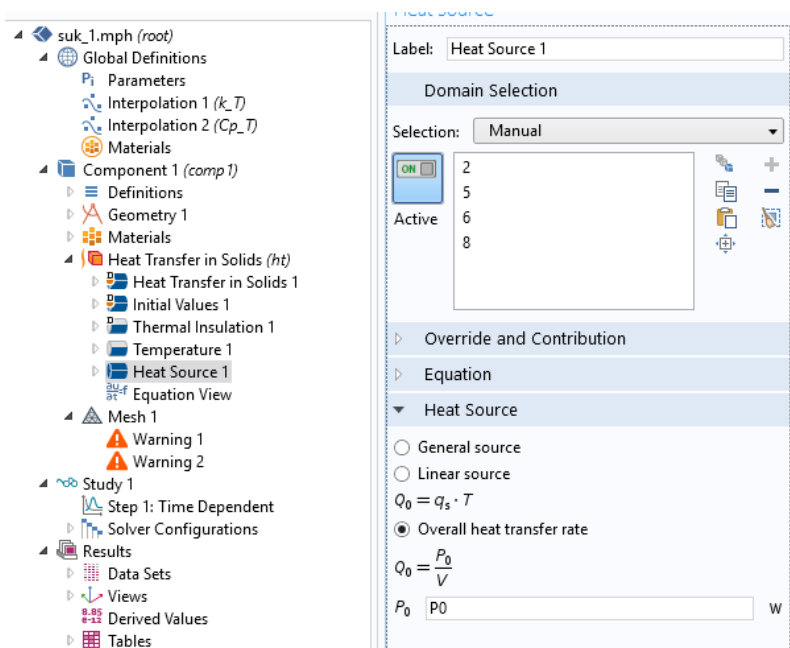


Рисунок 5.14 – Задание источника джоулевого нагрева

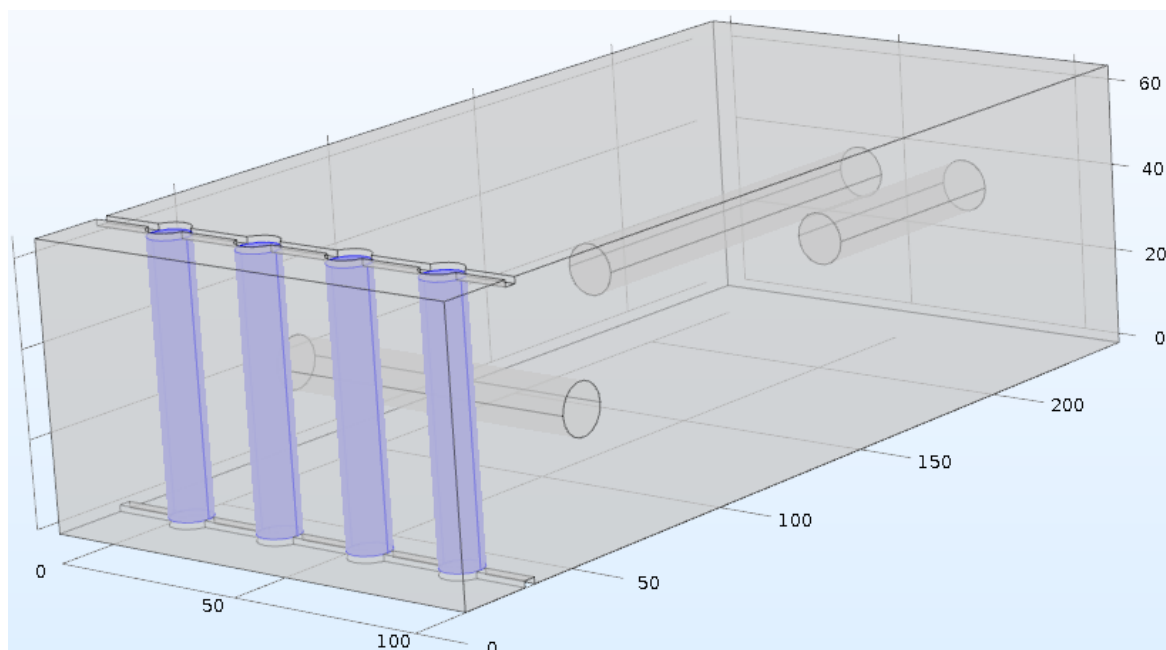


Рисунок 5.15 – Выбор источника нагрева

Задав геометрию, все свойства и граничные условия модели, необходимо провести разбиение области на конечные элементы. Наиболее простым способом является задание сетки по умолчанию [40]. Для того чтобы задать сетку, нужно в узле «Mesh» выбрать стандартную сетку и применить ее к модели (рисунки 5.16 – 5.17).

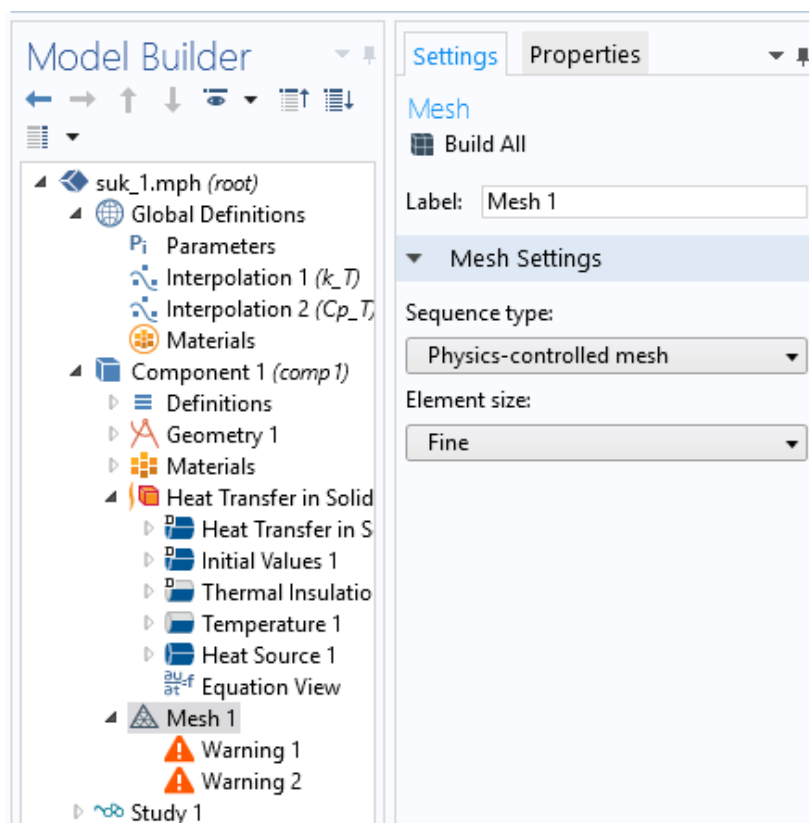


Рисунок 5.16 – Выбор стандартной сетки

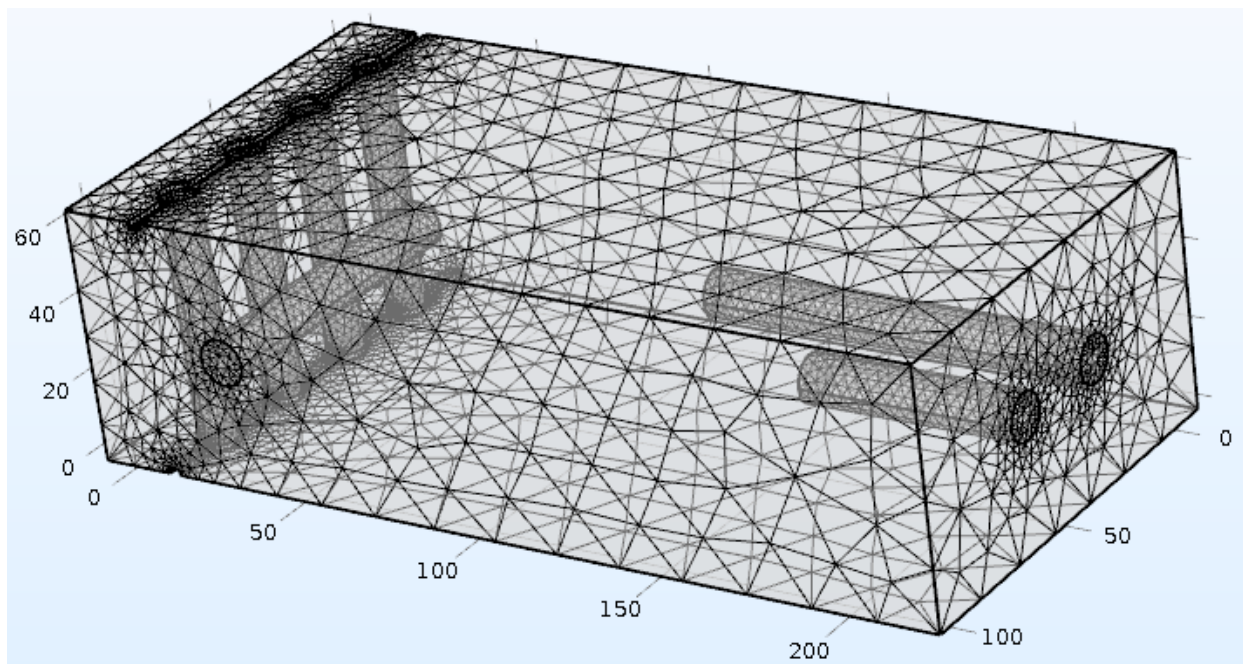


Рисунок 5.17 - Разбиение области на конечные элементы

Настроив сетку, переходим к параметру решателя, который был добавлен ранее (рисунок 5.17). В узле «Step: Time Dependent» необходимо настроить время и шаг моделирования, а также выбрать физический процесс, к которому будет применено данное решение (рисунок 5.18).

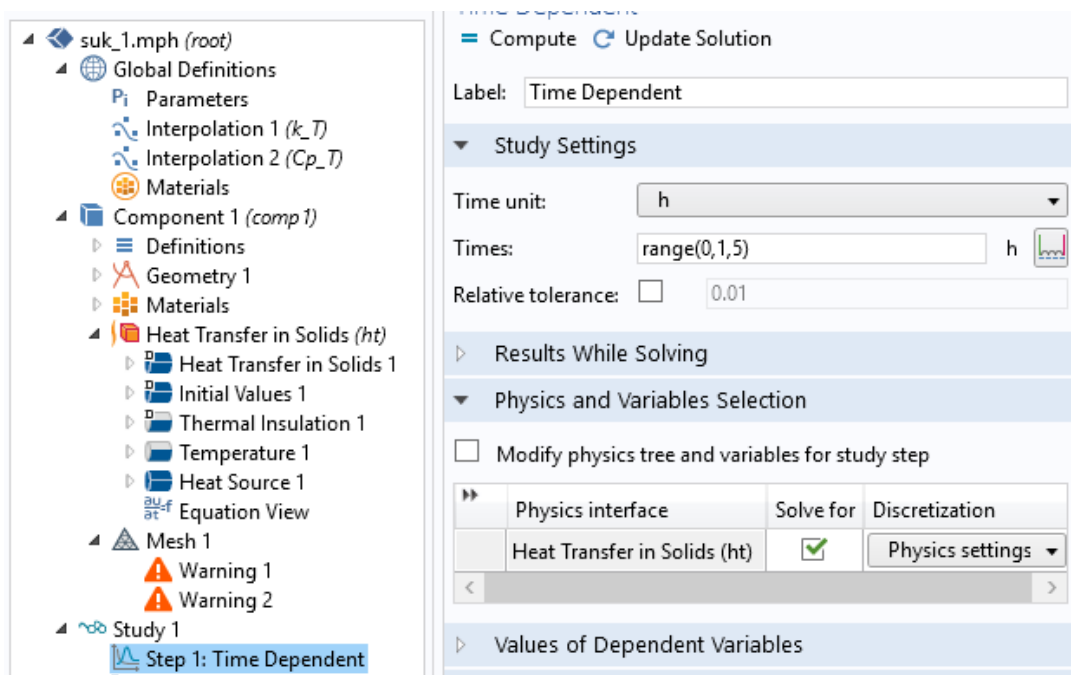


Рисунок 5.18 – Настройка решателя

На рисунке 5.19 видно, что время моделирования 5 часов с шагом в 1 час. Решатель выбран для нашего физического процесса теплопередачи в твердом теле. Нажав на кнопку «Compute», запуститься решатель [40].

После того, как закончиться решение в узле «Results», появятся результаты моделирования. На рисунке 5.19 предоставлен результат моделирования на конечном этапе, т.е. на 5 часу нагревания. С остальными результатами можно ознакомиться в приложении В на рисунках В.1-В.4.

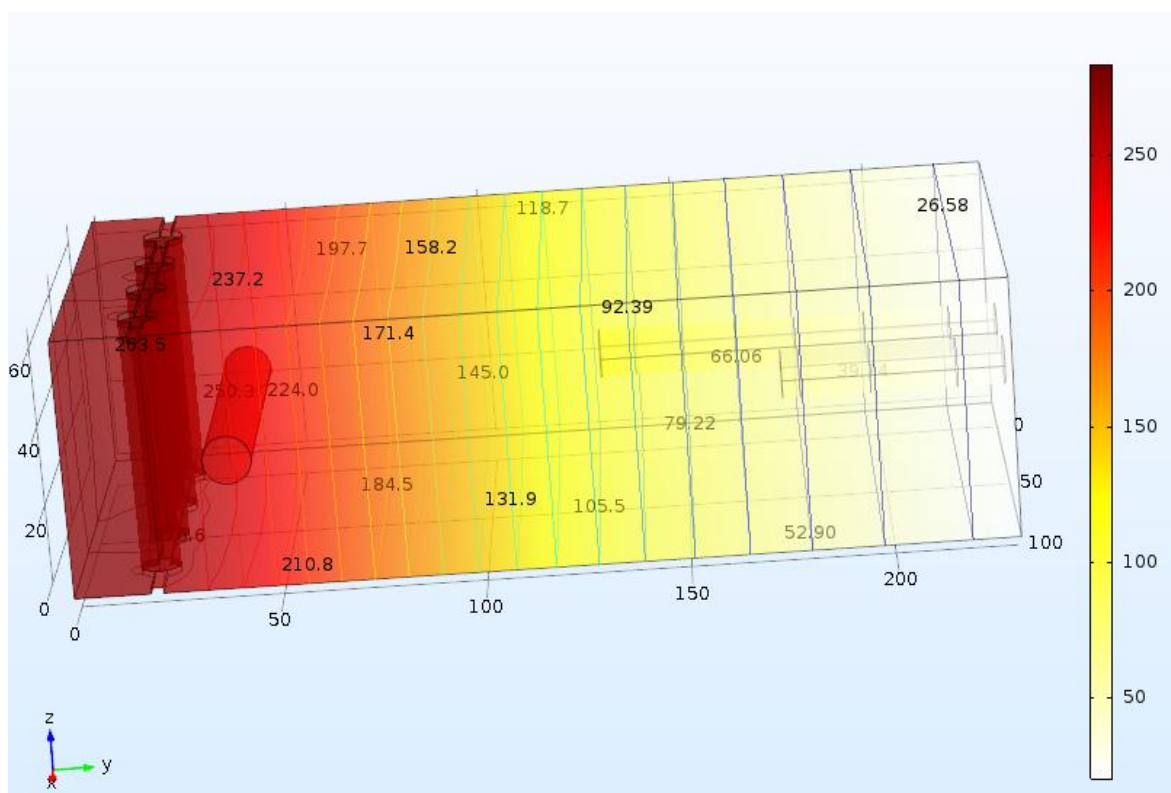


Рисунок 5.19 – Результат нагрева

По результату видно, прогрев идет равномерно, что соответствует нестационарной теплопроводности. Для более детального просмотра были сделаны графики температур по точкам, распределенным на модели. На рисунке 5.20 были выбраны точки на модели.

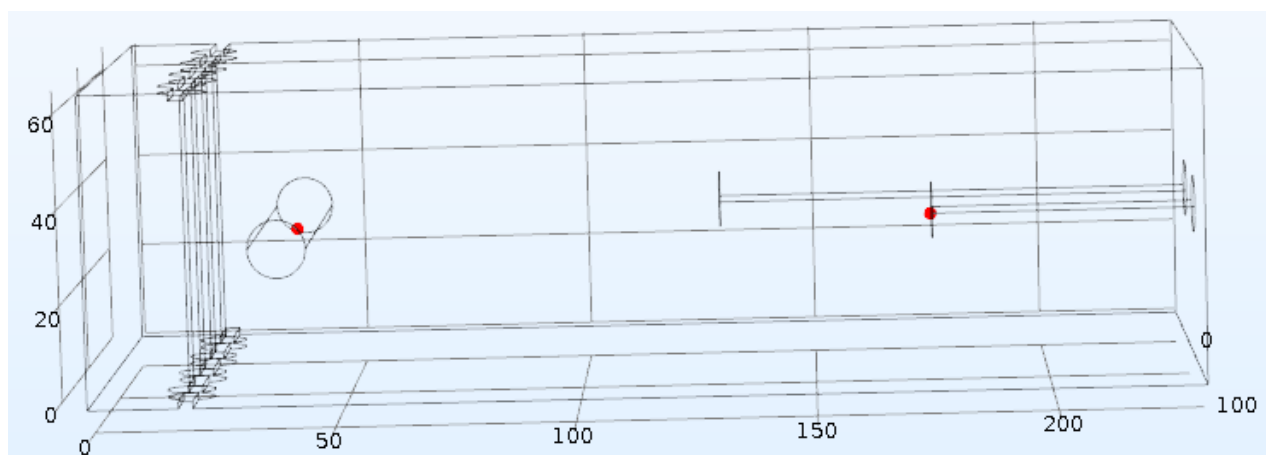


Рисунок 5.20 – Точки, взятые на модели

На рисунке 5.21 приведен график нагревания в течение 5 часов, выбранных ранее точек.

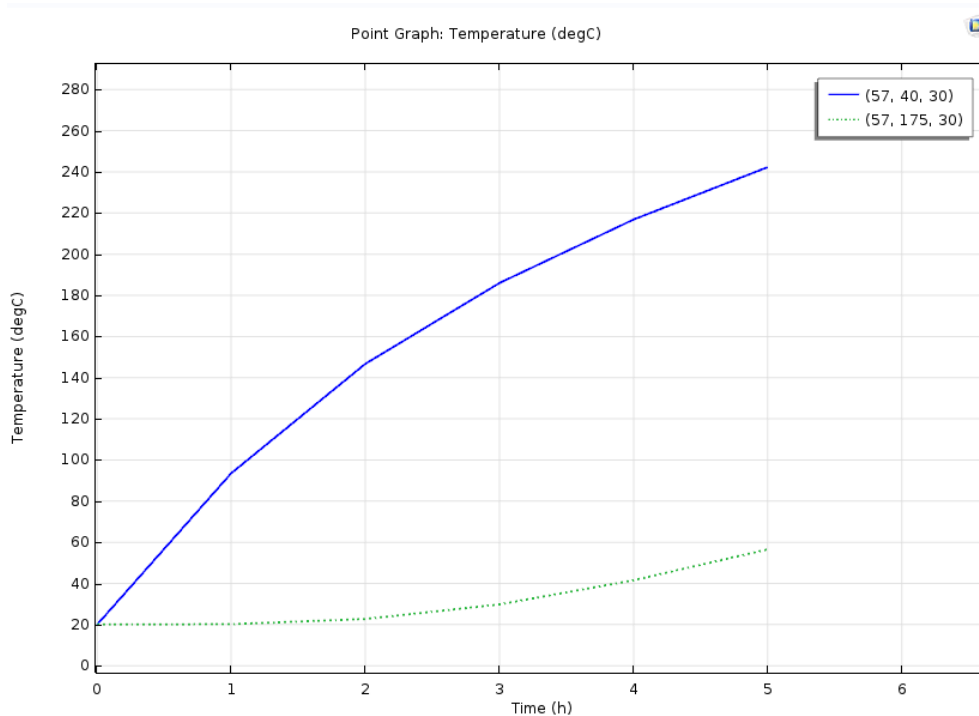


Рисунок 5.21 – График прогрева точек

На рисунке 5.21 в легенде указаны координаты установленных точек. Как видно из графика, при нагревании модели, температура растет с течением времени. Для того, чтобы сравнить экспериментальные данные с расчетными, импортируем их в Comsol и построим на одном графике (рисунок 5.22).

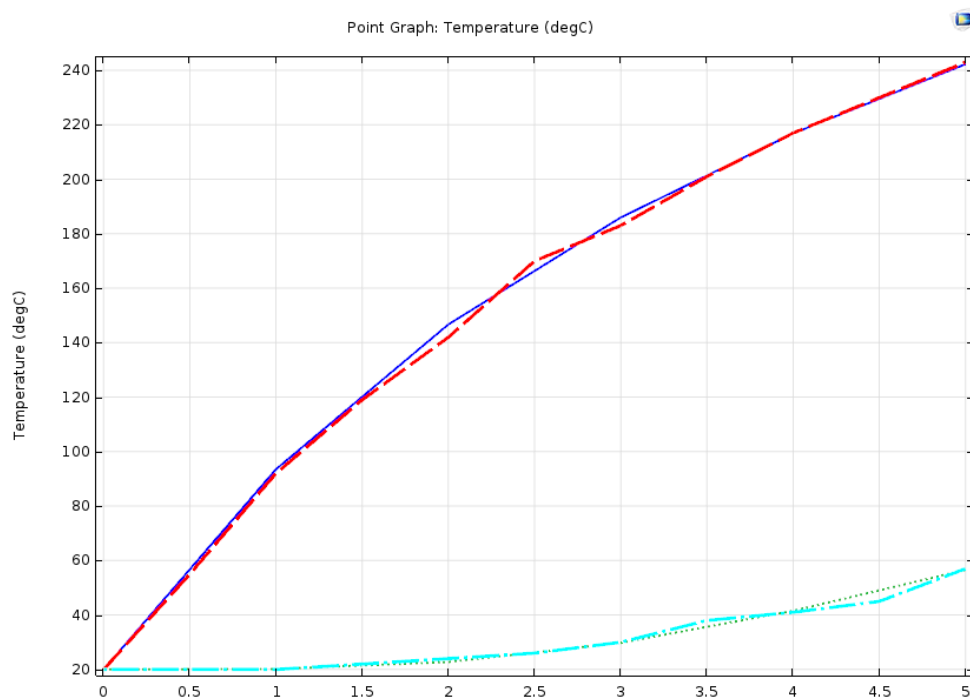


Рисунок 5.22 – График с экспериментальными и смоделированными данными

Из графика, отображенного на рисунке 5.22 очевидно, что моделирование прошло верно, как и опыт. Было выяснено, что данная задача относится к нестационарной теплопроводности. Решение которой возможно с помощью метода конечных элементов. Так как данная задача была довольно сложной для аналитического решения, она была рассчитана в среде Comsol Multiphysics. Убедившись в правильности результатов, можно приступить к опыту номер 2.

5.4 Исследование физической модели при изменении режимов работы

Проведение 2 опыта заключается в том, чтобы данные, полученные в ходе замеров, не были только возрастающими. В данном опыте будут получены перепады температуры в течение 5 часов. Перепады будут осуществляться за счет релейного управления. Реле находится на блоке цифровых выходов, который установлен на самописце VR06. На рисунке 5.23 показана схема подключения к DO181 [42].

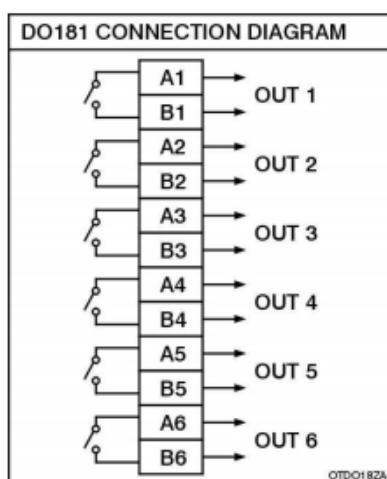


Рисунок 5.23 – Схема подключения к DO181

Настройка работы реле производится на самописце VR06 во вкладке «канал» (рисунок 5.24).

При настройке самописца нужно учитывать следующее. Существуют различные типы Н, L, НН, LL, которые должны быть выбраны для задания или для целей сигнализации [42].

Н: Высокий предел. Когда процесс превысит верхний предел, срабатывает сигнал тревоги или задание.

L: Нижний предел. Любой процесс ниже нижнего предела, срабатывает сигнал тревоги или задание

НН: Высокий предел, чтобы установить другой предел выше верхнего предела для двойного предупреждения.

LL: Низкий нижний предел, чтобы установить другой предел ниже нижнего предела для двойного предупреждения.

Задача 1 – это та задача, которая будет выполнена при происхождении события.

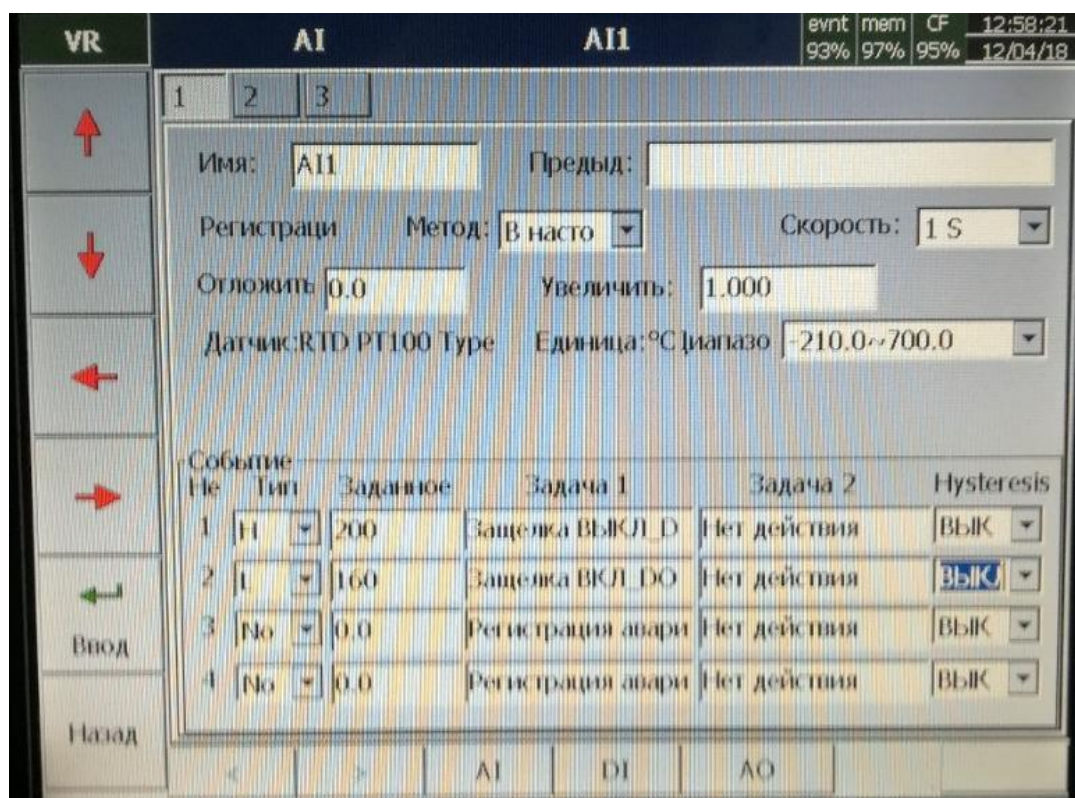


Рисунок 5.24 – Настройка работы реле

Задача 2 – это та задача, которая будет выполнена сразу же после ее настройки без какого-либо условия.

Так же возможна настройка работы реле по заданному таймеру.

В результате проведения опыта кирпич был нагрет в течение 5 часов с перепадами температур. Снятые значения были занесены в приложение В, в таблицу В.1, они понадобятся для дальнейших исследований. Так же в приложение В на рисунке В.1 имеется график изменения температуры, снимаемой с физической модели.

5.5 Прогнозирование параметров с помощью нейросети

Нейронные сети – это вычислительная система, что моделирует обычные биологические процессы, сравниваемая со структурой человеческого мозга. Приспособленные и обучаемые, представляют собой распараллеленные системы, которые обучаются при помощи анализа позитивных и негативных воздействий. Искусственный нейрон, названный так из-за схожести с настоящим нейроном, считается в данных сетях элементарным преобразователем [45].

Нейрон представляет собой элемент, включающий в свою структуру умножители (синапсы), сумматор и нелинейный преобразователь. Синапсы обеспечивают связь между нейронами путем умножения входных сигналов на параметры, характеризующие силу связи, так называемые веса синапсов. Входные сигналы, поступающие через синаптические каналы как от других нейронов, так и от

внешних источников, подвергаются суммированию с помощью сумматора. Нелинейный преобразователь реализует функцию одного аргумента – выходного сигнала сумматора – в нелинейной форме. В совокупности нейрон осуществляет вычисление скалярной функции векторного аргумента [45]. Математическая модель данного нейрона задается следующими соотношениями:

$$s = \sum_{i=1}^n w_i x_i + b, \quad (5.8)$$

где w_i – вес синапса;
 b – значение смещения;
 s – результат суммирования;
 x_i – компонент входного вектора;
 n – число входов нейрона.

В MatLab имеется пакет «Neural Network Toolbox», предназначенный для работы с нейронными сетями [44]. Данный графический интерфейс позволяет ввести необходимые данные для выбора структуры сети и ее обучения (рисунок 5.25).

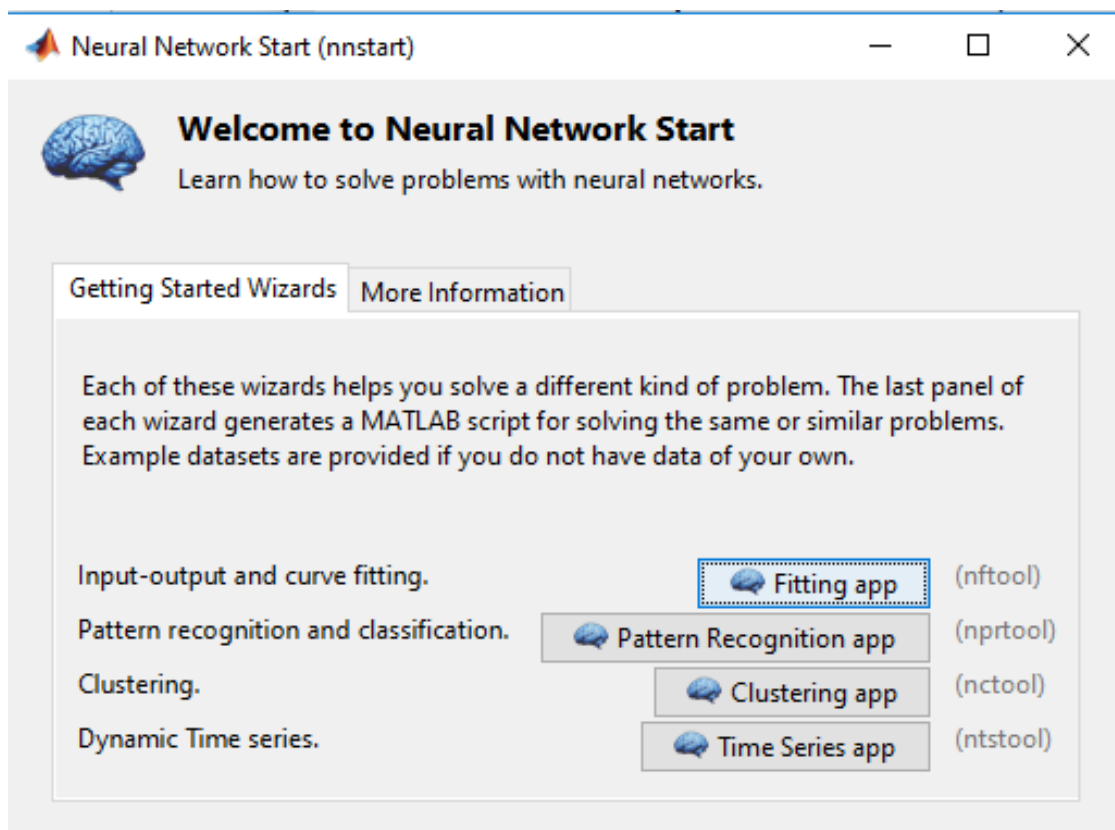


Рисунок 5.25 – Выбор структуры нейросети

Далее требуется подать входные и выходные значения (рисунок 5.26). На вход подадим температуру, измеренную вдоль кирпича и коэффициент теплопроводности. На вход будет подана температура, измеренная вблизи источника нагревания. Входные и выходные данные будут импортированы в виде матриц [44].

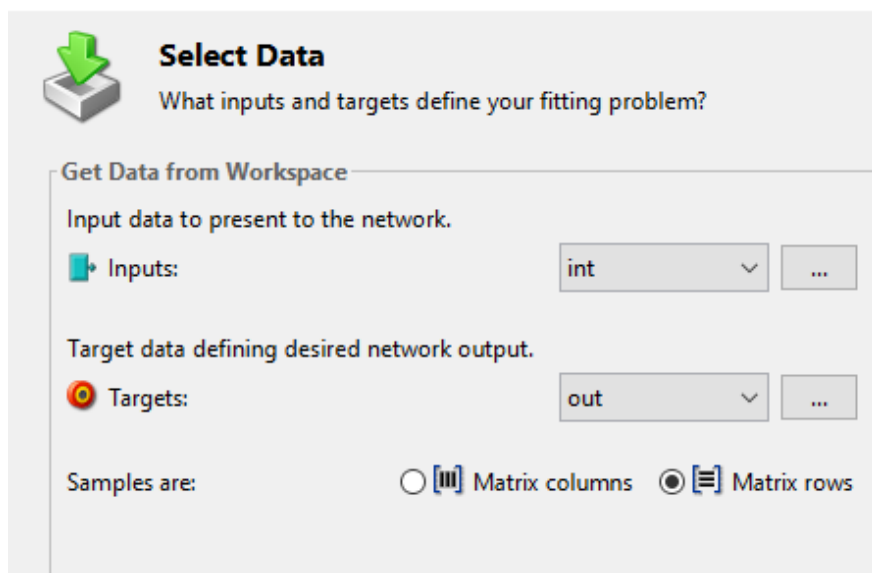


Рисунок 5.26 – Настройка входных и выходных данных

Создаем нейронную сеть. Тип нейронной сети, выберем персептрон с 50 логистическими нейронами в скрытом слое и 1 линейным нейроном выходного слоя (рисунок 5.27). При обучении был применен алгоритм Левенберга-Марквардта.

Так как входные данные были занесены в матрицы размерностью 220×2 и 220×1 , в настройках следует выбрать транспонированные матрицы. После входные матрицы будут перемножаться с обратными. После данной операции полученная матрица, перемножается с выходной матрицей [44].

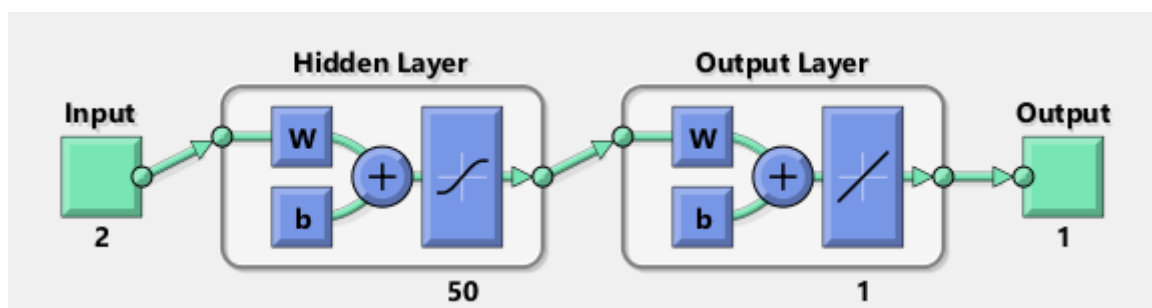


Рисунок 5.27 – Архитектура нейросети

Далее после 30 итераций обучение сети было завершено. На рисунке 5.28 изображен график, отражающий точность обучения. Он показывает зависимость среднеквадратической ошибки от итерации обучения. Обучение заканчивается, когда ошибка на валидационном наборе данных перестает уменьшаться.

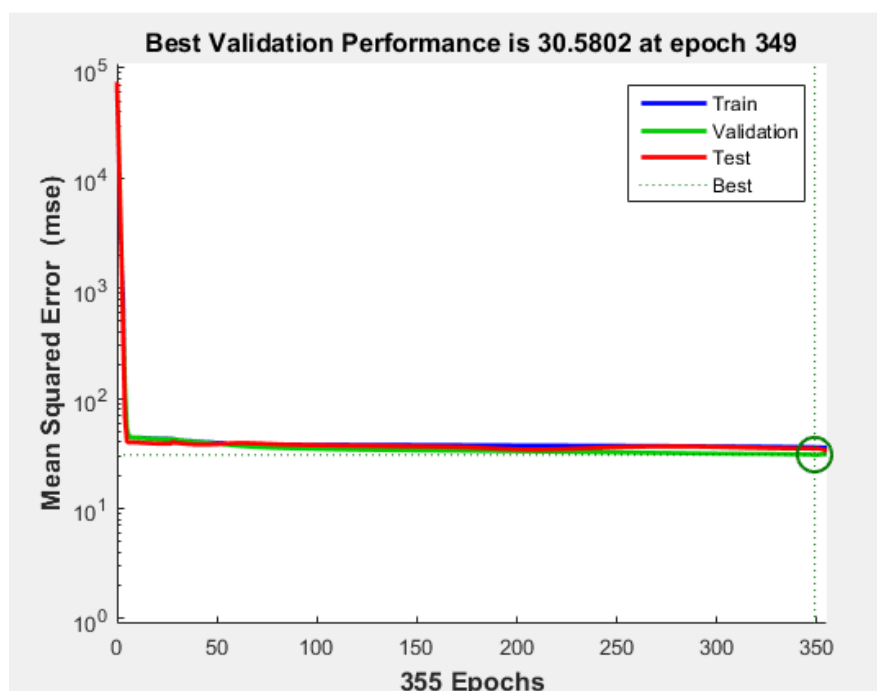


Рисунок 5.28 – График зависимости среднеквадратической ошибки от итерации обучения

После обучения была выполнена проверка нейросети (рисунок 5.29).

```
>> sim(net,[0.0000005;45.1])

ans =

    232.3201
```

Рисунок 5.29 – Проверка работоспособности обученной сети

Сеть была успешно обучена. Для прогнозирования температуры нейросети удобны тем, что нет необходимости в задании сложного алгоритма и не производятся громоздкие математические вычисления. Данный способ вполне приемлем, для использования, при стандартных параметрах системы.

5.6 Исследование на устойчивость теплового режима печи с применением регуляторов

Для того, чтобы начать моделирование необходимо выбрать пространство, в котором будет построена модель. Выбираем 2 D пространство. Далее выбираем физический процесс протекающей в нашей модели. На рисунке 5.4 можно увидеть список предоставляемых решаемых физических задач. Выбираем для нашей модели Heat Transfer in Solids. Heat Transfer in Solids – это интерфейс теплопередачи в твердых телах используется для моделирования теплопроводности, конвекции и излучения. Необходимо также выбрать решатель. Их список приведен

на рисунке 5.5. Выберем решатель «Time Dependent», так как будет смоделирован динамический процесс.

После предварительных настроек была построена сама модель при помощи встроенного CAD-редактора (рисунок 5.30).

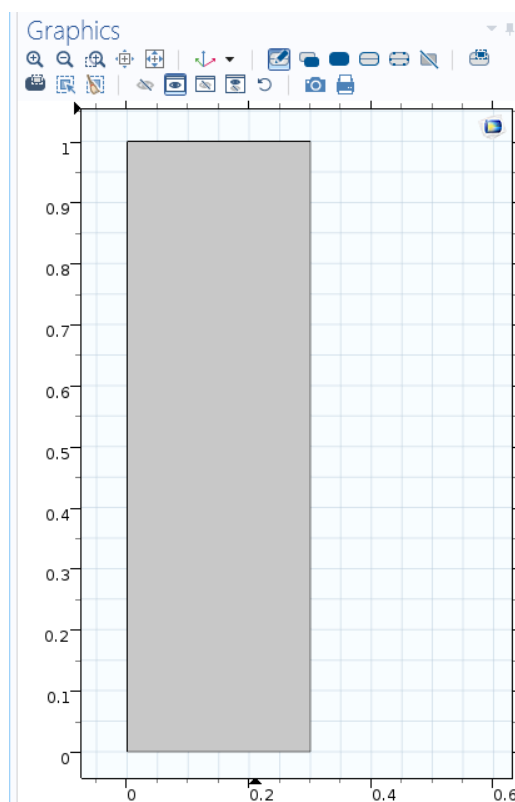


Рисунок 5.30 – Геометрия моделируемого объекта

Далее были заданы константы, используемые в ходе расчета (рисунок 5.31), которые были описаны выше.

Parameters		
Name	Expression	Value
c1	385[J/kg/K]	385 J/(kg·K)
h1	200[W/m^2/K]	200 W/(m ² ·K)
k1	200[W/m/K]	200 W/(m·K)
p1	4700[kg/m^3]	4700 kg/m ³
T0	293[K]	293 K

Рисунок 5.31 – Константы необходимые для расчета

После было задано управляющее воздействие для разомкнутой системы управления в соответствии с таблицей 5.1. Функция была обозначена как T_{cp_fun} .

После задания начальных условий, были определены граничные условия (рисунок 5.32). Были заданы условия конвективного теплообмена.

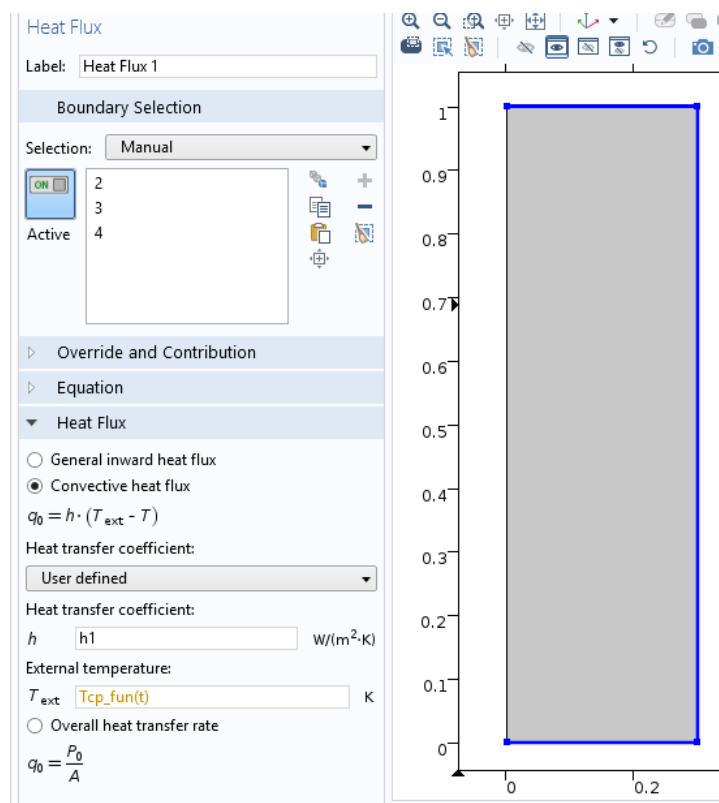


Рисунок 5.32 – Задание граничных условий

На рисунке 5.33 показана сгенерированная сетка.

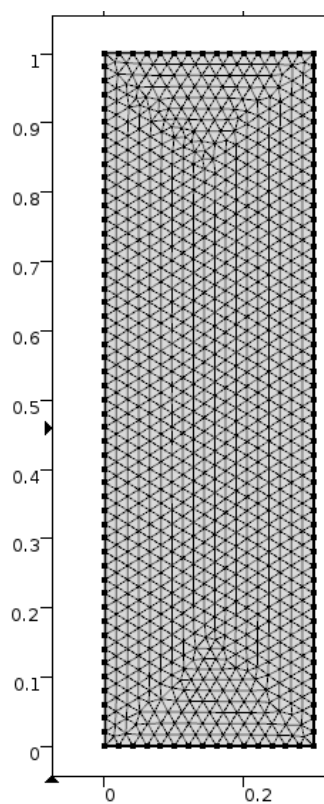


Рисунок 5.33– Разбиение области на конечные элементы

Далее в решателе были настроены параметры. Диапазон равный 3000 с и шаг равный 500 с.

На рисунке 5.34 предоставлен контурный график распределения температурного поля в конечный момент времени $t = 3000$ с.

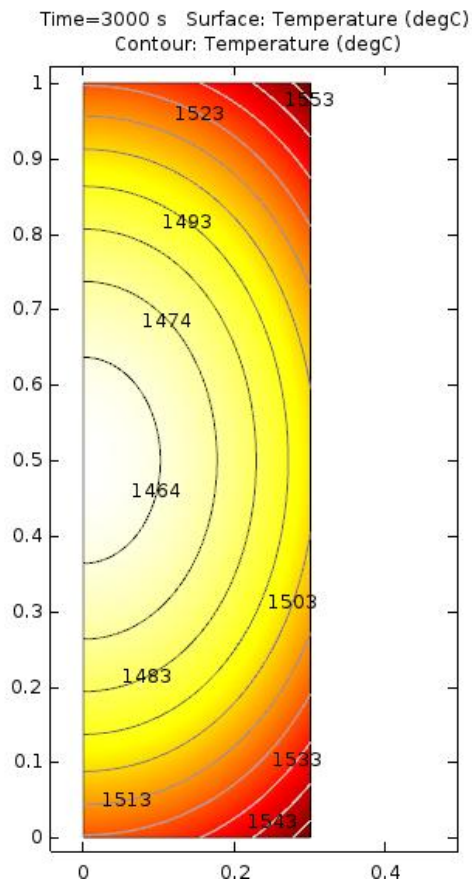


Рисунок 5.34 – Контурный график распределения температурного поля

Также были заданы три точки на модели (рисунок 5.35).

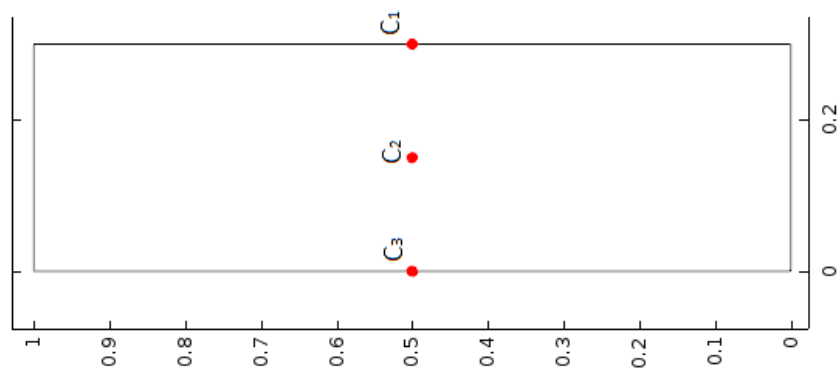


Рисунок 5.35 – Точки, выбранные на модели

По выбранным точкам были построены графики зависимостей температуры-времени (рисунок 5.36).

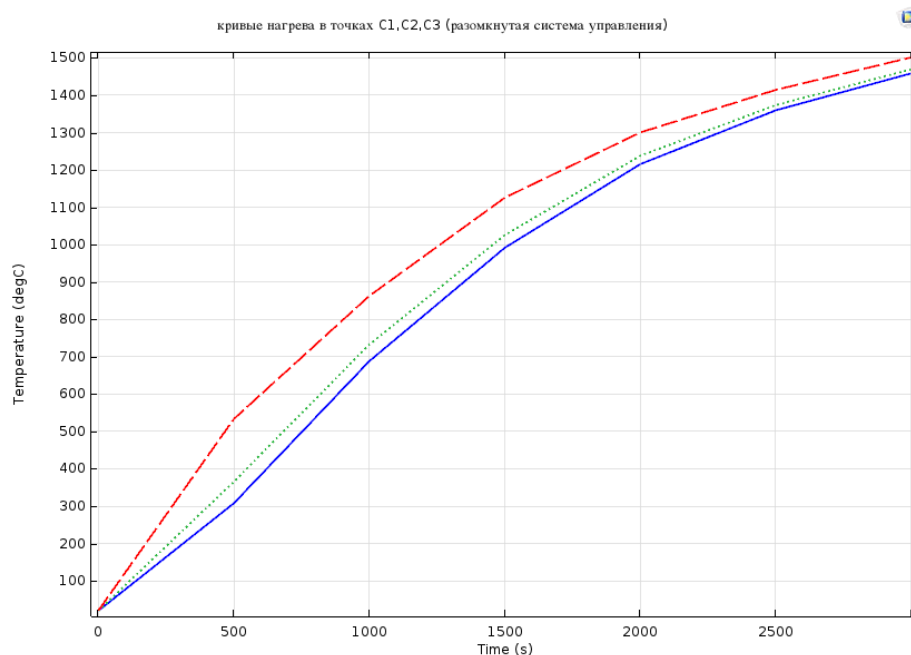


Рисунок 5.36 – Кривые нагрева в точках C_1 , C_2 , C_3

Исследование замкнутой системы с пропорциональным регулятором.

Далее построим модель замкнутой системы управления с пропорциональным регулятором. Для этого потребуется добавить следующие константы: $T_{set}=1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ - желаемое значение температуры в конце нагрева, $k_p = 50$ коэффициент усиления пропорционального регулятора, T_{up} – максимальное значение управляющей функции T_{down} – минимальное значение управляющей функции [43].

Для датчика температуры была выбрана точка на модели, с которой он считывает информацию (рисунок 5.37).

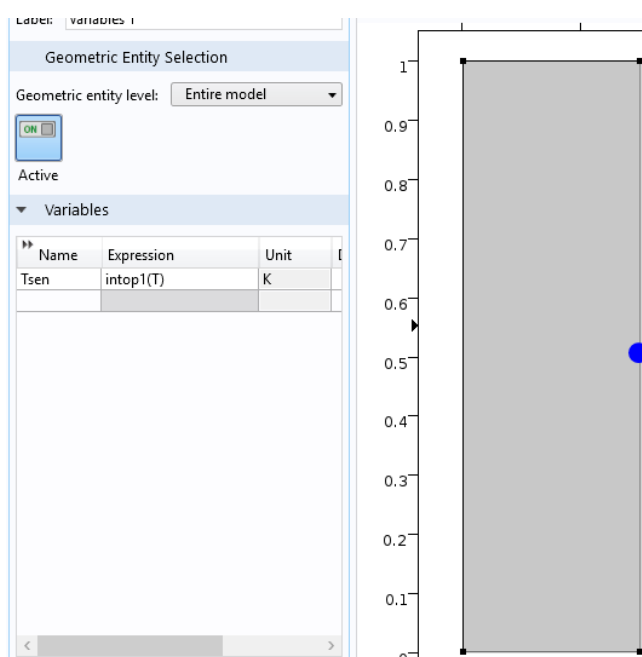


Рисунок 5.37 – Точка, с которой датчик считывает температуру

Далее была задана формула, описывающая алгоритм работы пропорционального регулятора (рисунок 5.40).

Name	Expression	Unit
Tcp_p	(Tset-Tsen)*kp	K

Были определены граничные условия и заданы условия конвективного теплообмена.

Heat transfer coefficient:

h W/(m²·K)

External temperature:

T_{ext} K

☐ Overall heat transfer rate

$q_0 = \frac{P_0}{A}$

Рисунок 5.38 – Задание граничных условий

По выбранным точкам на рисунке 5.37 были построены графики зависимостей температуры-времени (рисунок 5.39).

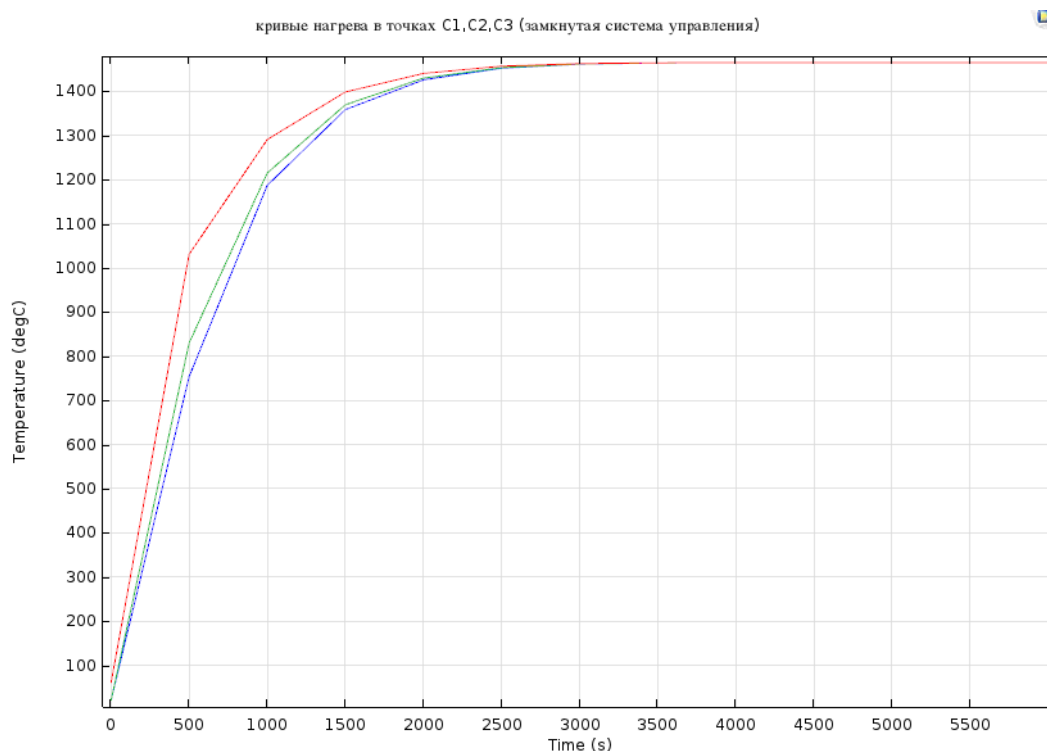


Рисунок 5.39 – Кривые нагрева в точках C₁, C₂, C₃

Как видно с помощью регулятора температура была настроена почти на нужное значение.

На рисунке 5.40 приведено значение управляющей функции в функции времени.

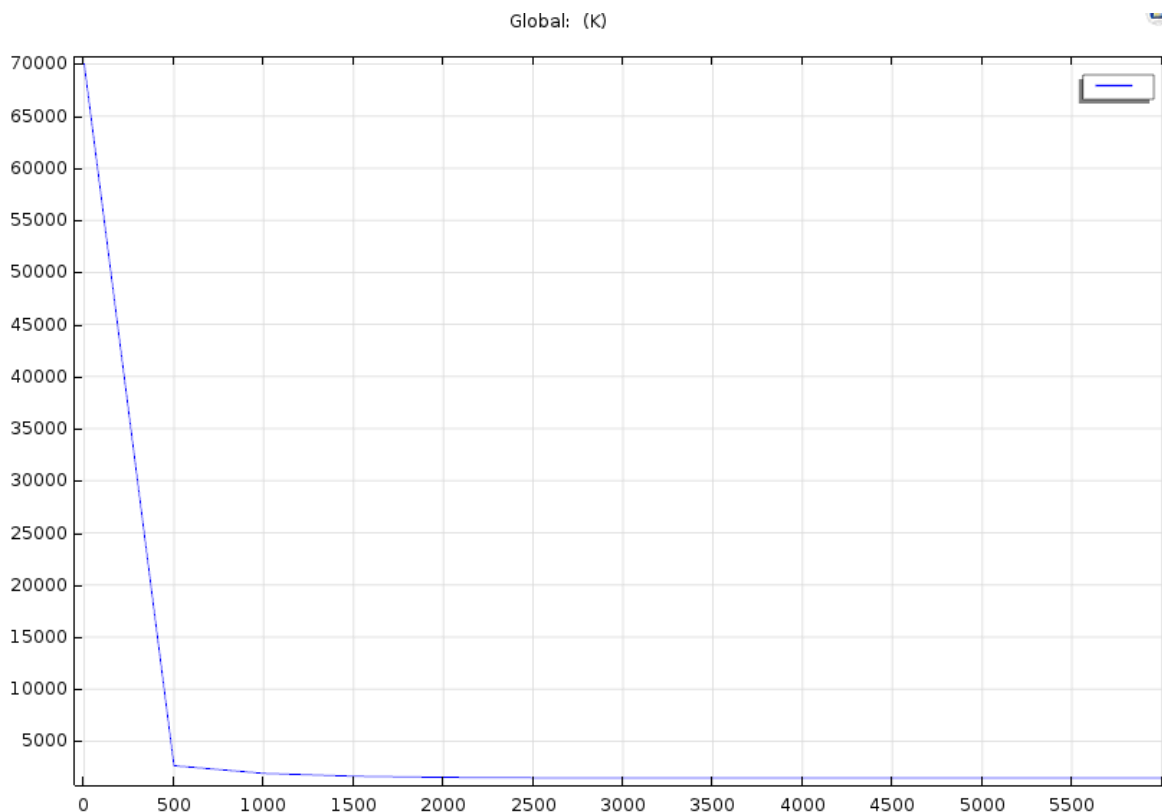


Рисунок 5.40 – Управляющая функция

Как видно из рисунка 5.40 управляющая функция вычислена без учета ограничения. Учитывая данное ограничение, были заданы ограничения для управляющей функции:

T_{cp}	$T_{cp_p}*(T_{cp_p} \leq T_{up} \&\& T_{cp_p} \geq T_{down}) + T_{up}*(T_{cp_p} > T_{up}) + T_{down}*(T_{cp_p} < T_{down})$
----------	--

Задав граничные условия, был получен следующий график (рисунок 5.41).

Как видно из рисунка 5.41, в начальный момент времени $0 \leq t \leq 2500$ с значение управляющей функции равно максимальному значению $T_{cra} = T_{cp} = T_{up} = 1800$ °C.

Построим компьютерную модель замкнутой системы управления с учетом наличия апериодического звена в канале управления. Для того чтобы записать в Comsol, был добавлен узел «Global Equation» (рисунок 5.41). Данный раздел позволяет вводить пользовательские дифференциальные уравнения, которые могут использоваться только в данной модели, так как узел не состоит в глобальных переменных.

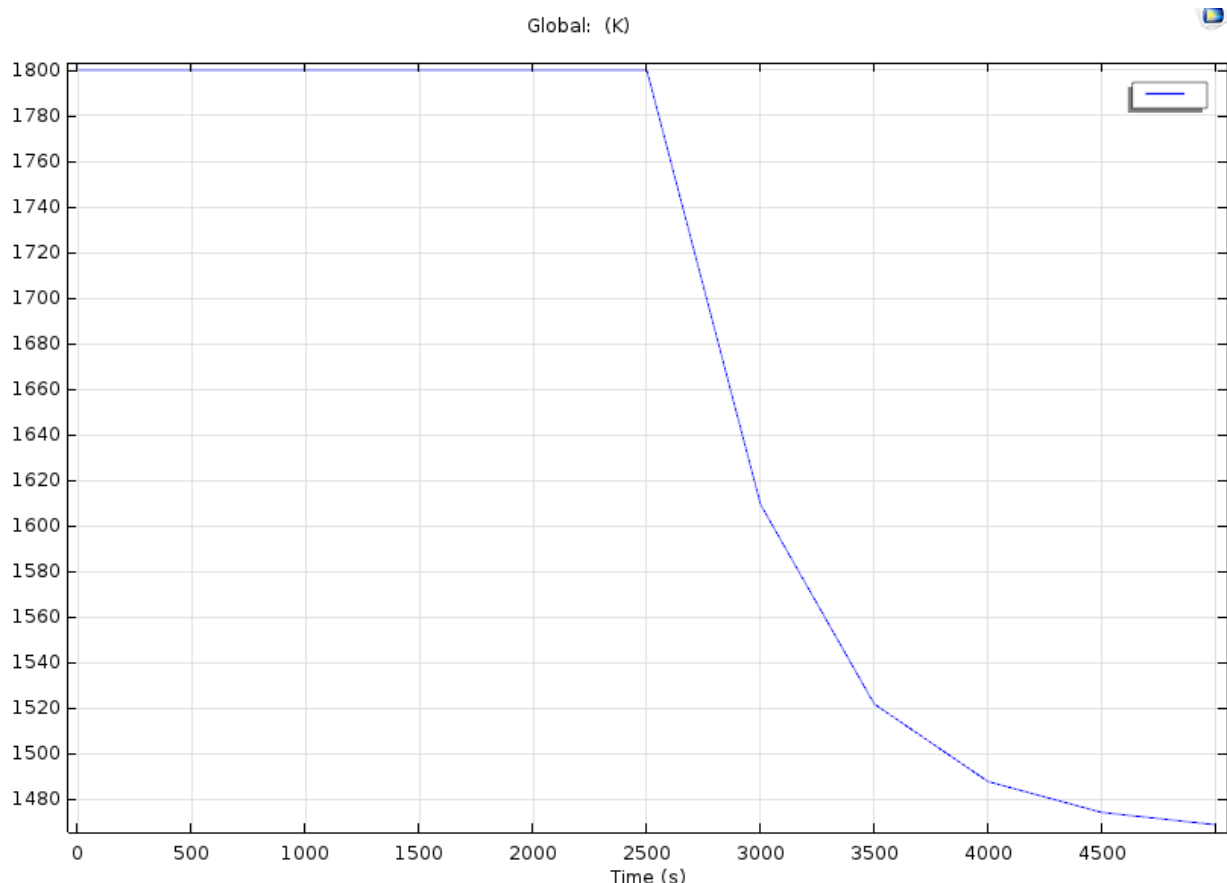


Рисунок 5.41 – Функция П-регулятора с ограничением

Global Equations	
$f(u, u_t, u_{tt}, t) = 0, u(t_0) = u_0, u_t(t_0) = u$	
Name	$f(u, u_t, u_{tt}, t) (1)$
T_{cra}	$a1 \cdot T_{cra} + T_{cra} - b1 \cdot T_{cp}$

Рисунок 5.42 – Инерциальное звено

Далее были определены граничные условия. И построен график управляющей функции (рисунок 5.43).

На рисунке 5.43 показаны значения управляющей функции T_{cra} и температура в рабочем пространстве печи T_{cp} .

Для уменьшения статической ошибки регулирования добавим к пропорциональному регулятору интегральную часть.

Добавив интегральную часть, пропорциональный регулятор станет пропорционально-интегральным регулятором.

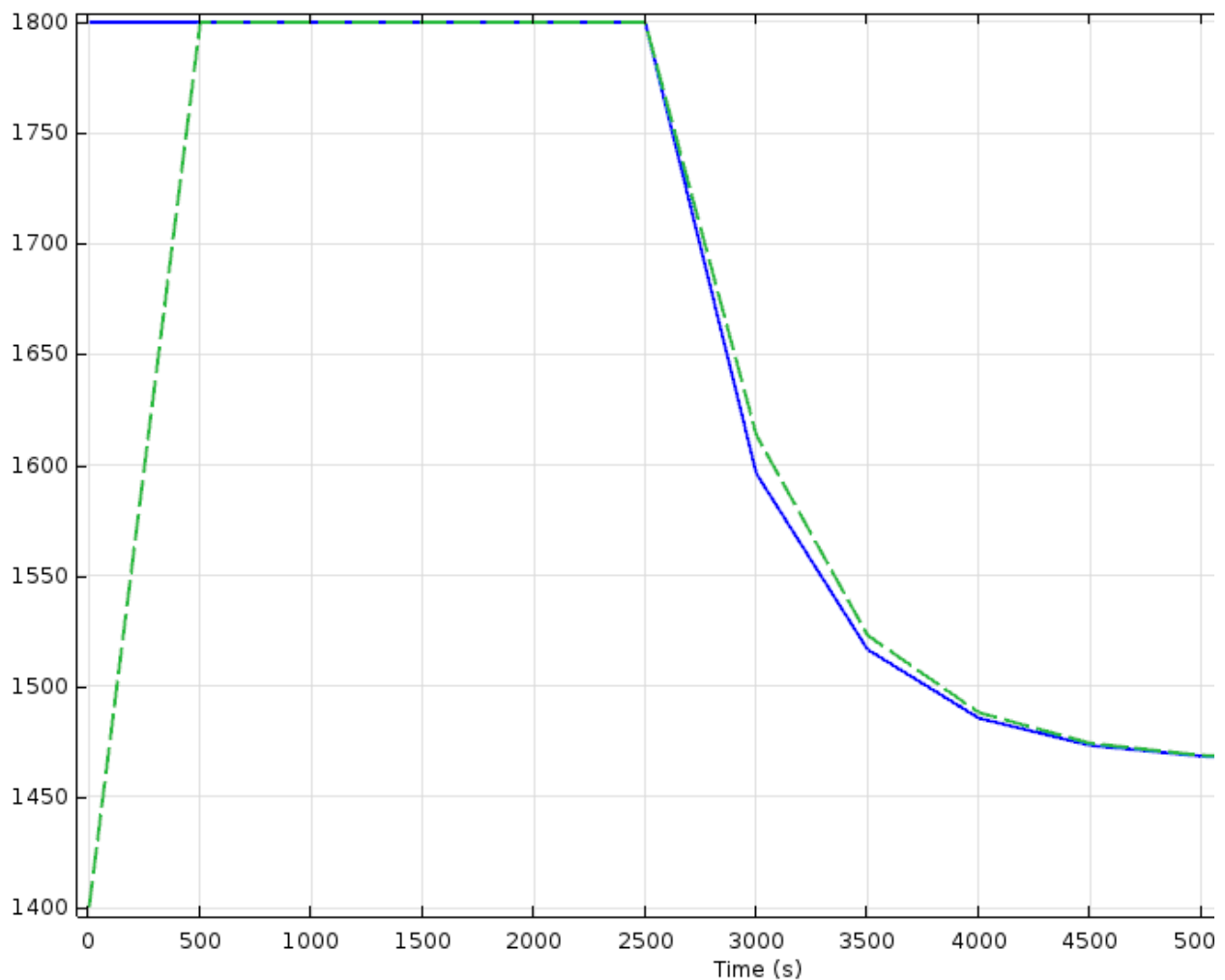


Рисунок 5.43 – График управляющей функции, П-регулятор, с учетом инерционности в канале управления

Замкнутая система с пропорционально-интегральным регулятором.

Построим компьютерную модель замкнутой системы управления с пропорционально-интегральным регулятором. Добавим константу $k_i = 0,002$ – коэффициент усиления интегрального регулятора.

Запишем интегральную часть выражения (5.44) в дифференциальной форме [45]:

$$\text{Int} = \int_0^t (T_{\text{set}} - T_{\text{sensor}}) dt, \quad (5.9)$$

$$\frac{d(\text{Int})}{dt} - (T_{\text{set}} - T_{\text{sensor}}) = 0. \quad (5.10)$$

Выражение было занесено в Comsol (рисунок 5.44).

$$f(u, u_t, u_{tt}, t) = 0, \quad u(t_0) = u_0, \quad u_t(t_0)$$

Name	f(u,ut,utt,t) (1)
Tcpa	a1*Tcpa+Tcra-b1*Tcp
Int	Intt-(Tset-Tsen)

Рисунок 5.44 – Интегральная часть

Далее была занесена формула, описывающая алгоритм работы пропорционально-интегрального регулятора (рисунок 5.45).

Variables	
Name	Expression
Tcp_p	(Tset-Tsen)*kp+ki*Int

Рисунок 5.45 – Алгоритм работы пропорционально-интегрального регулятора

На рисунке 5.46 показано рассчитанное нестационарное температурное поле.

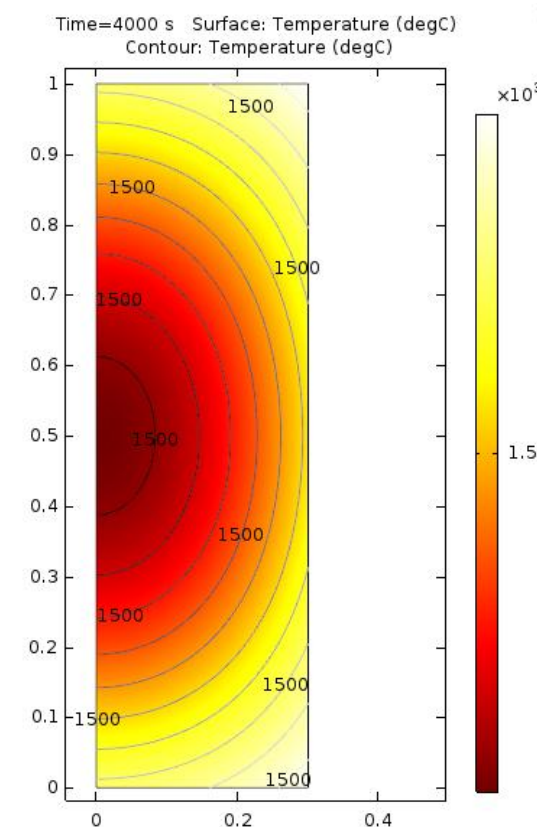


Рисунок 5.46 – Температурное поле при $t = 1500^\circ\text{C}$

По выбранным точкам на рисунке 5.35 были построены графики зависимостей температуры-времени (рисунок 5.47).

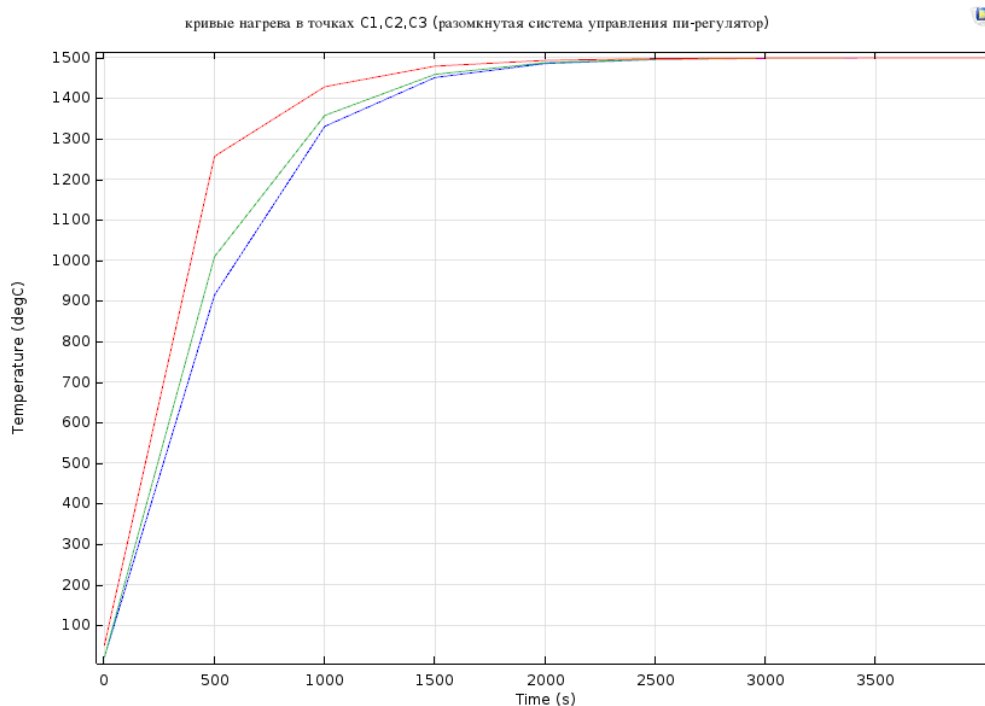


Рисунок 5.47 – Кривые нагрева в точках C_1 , C_2 , C_3

Управляющая функция пропорционально-интегрального регулятора предоставлена на рисунке 5.48.

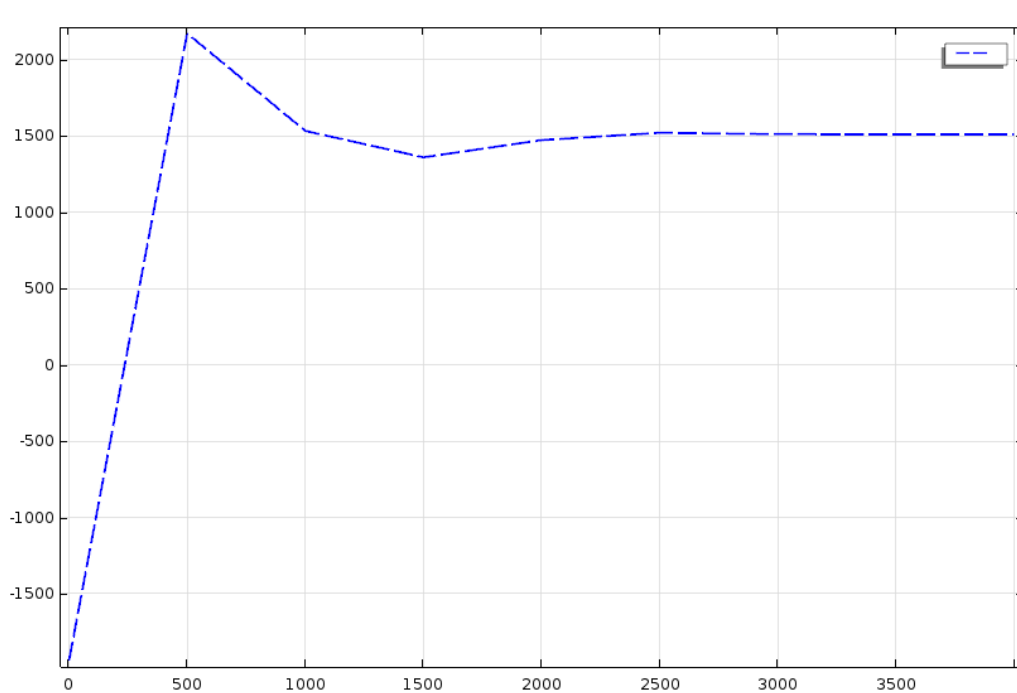


Рисунок 5.48 – Управляющая функция пропорционально-интегрального регулятора

Сравнивая графики на рисунках 5.47, 5.48 можно сделать вывод, что пропорционально-интегральный регулятор подходит больше, так как устраняет статическую ошибку.

5.7 Заключение по разделу

Предложен инновационный метод измерения температуры. Метод заключается в том, что, зная температуру снаружи печи в зоне аптейка, система должна спрогнозировать температуру внутри печи.

Для решения этой задачи были рассмотрены и проанализированы существующие на сегодняшний день методы контроля теплового режима в печи Ванюкова, а именно контактный и бесконтактный методы.

Была разработана физическая модель, которая отражает основные свойства реального объекта. В результате проведения экспериментов были получены исходные данные для реализации математической модели и для проведения дальнейших экспериментов на нейросети.

Была разработана математическая модель для физического объекта, основанная на законе теплопередачи. Математическая модель была реализована и исследована с помощью программной платформы Comsol Multiphysics, в результате экспериментов были получены графики, которые отображали изменения температурного поля в физической модели в результате его джоулевого нагрева в течение 5 часов.

На основе полученных экспериментальных данных была обучена нейросеть, разработанная в MatLab. В результате работы нейросети получены данные прогноза распространения теплового потока.

Результаты, изложенные в данном разделе, были опубликованы в научных статьях: [54], [55].

ВЫВОДЫ И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведенные исследования нескольких режимов процесса плавки позволили выделить основные особенности его как объекта управления и экспертного анализа: сложность, инерционность, многообразие вариантов компоновки аппаратурно-технологического оформления, влияние характеристик окружающей среды и степени выходных характеристик и предложить формализованное описание процесса

На основе предложенного формализованного описания процесса разработана структура гибридной системы, включающая подсистемы описания экспертных знаний о процессе, математического моделирования, вывода решения, сбора и оценки достоверности экспертных знаний, интеллектуальный интерфейс.

На основе проведенного анализа систем управления объектами данного класса выбраны режимы функционирования и сформирован алгоритм функционирования гибридной системы для целей управления сложным ТК ПВ.

Основные результаты следующие:

1. В рамках оценки технического состояния технологического комплекса медеплавильного производства была выявлена необходимость синтеза эффективной и надежной гибридной системы управления.

2. Аналитический обзор существующих систем и подходов к управлению показал, что интеграция различных методов и технологий может значительно улучшить результаты работы комплекса.

3. Теоретическое обоснование и синтез гибридной системы управления дали возможность разработать структуру математической модели, которая учитывает все ключевые параметры и процессы. Эта модель стала основой для создания алгоритмов, способных адаптироваться к изменениям в процессе и обрабатывать большие объемы данных.

4. Синтезированные модели и алгоритмы были проверены на прототипе гибридной системы управления. Испытания показали, что система обладает высокой чувствительностью и устойчивостью, а также способностью к однозначному реагированию на различные ситуации.

5. Оценка адекватности системы подтвердила ее эффективность и показала, что предложенная концепция гибридной системы управления является перспективным направлением для дальнейшего развития технологических комплексов медеплавильного производства.

6. Была разработана физическая модель, как прототип гибридной системы, которая отражает основные свойства реального объекта. В результате проведения экспериментов были получены исходные данные для реализации математической модели и для проведения дальнейших экспериментов на нейросети.

7. Была разработана математическая модель для физического объекта, основанная на законе теплопередачи. Математическая модель была реализована и исследована с помощью программной платформы Comsol Multiphysics, в результате экспериментов были получены графики.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Ванюков А.В., Быстров В.П., Васкевич А.Д. и др. Плавка в жидкой ванне. Под ред. А.В. Ванюкова. – Москва: Металлургия, 1988,
- 2 Кожахметов С.М. Избранные труды. Исследования в области теории и технологии автогенных процессов. – Алматы, 2005
- 3 Кишнев В.В., Текиев Ю.М. Автоматическое управление процессом плавки медно-цинковых концентратов в жидкой ванне. – Москва. Научные труды МИСиС, 1981, № 128, 89-97.
- 4 Иванов В.А., Николаева Н.И., Ибраев А.Х., Шапировский М.Р. Математическая модель надфурменной зоны печи Ванюкова. – Москва. Цветная металлургия. 1990, № 8, с. 113-115.
- 5 Шапировский М.Р. и др. Математическое моделирование металлургических процессов. – Москва. МИСиС, 1987 – 89 с.
- 6 Скуратов А.П., Журавлев Ю.А., Григорьев О.М. Моделирование теплофизических процессов. Разработка математической модели теплообмена в энергетическом комплексе для плавки в жидкой ванне. – Красноярск, 1989. 110-118 с.
- 7 Bull. Mater. Sci. Роль математического моделирования в металлургии. 1989. -12. № 3-4. p. 353-368.
- 8 Skeley Julian. Mathematical models in new process development (математические модели в разработке новых процессов). – JOM, 1990. 42, № 2. – p. 16-21.
- 9 Сулейменов Б.А. Интеллектуальные и гибридные системы управления технологическими процессами. – Алматы: Шикун, 2009. - 320 с.
- 10 Салихов З.Г., Зыков И.Е., Кимяев И.Т., Спесивцев А.В., Лазарев В.И. Интеллектуальная система управления комплексом ПВ-2 Медного завода ЗФ ОАО «ГМК «Норильский никель». «Цветные металлы», № 12, 2007 с. 101-104/
- 11 Данилова Н.В. Записки Горного института, Полезные ископаемые России и их освоение. Применение теории планирования, для исследования процесса Ванюкова. – Санкт-Петербург, изд. РИЦ СПбГИ (ТУ), 2009. т. 182, стр. 148-151
- 12 Данилова Н.В. Записки Горного института, Полезные ископаемые России, и их освоение. Расчет материальных потоков пирометаллургического цикла переработки медного сульфидного сырья. – Санкт-Петербург, изд. РИЦ,СПбГИ (ТУ), Т.186, 2010. стр. 176-180.
- 13 Сулейменов Б.А., Мутанов Г.М., Сулейменов А.Б. 2010. Интеллектуальные системы управления: теория, методы, средства. – Алматы; Издательство КазНУим. АльФараби, С.219.
- 14 Гаскаров Г.А. Интеллектуальные информационные системы: учебник для вузов. – М.: Высш. шк., 2003. – 431 с.
- 15 Ларичев О.И. Теория и методы принятия решений. - М.: Логос, 2000.- 250 с.
- 16 Задел А.А. Понятие лингвистической переменной, его применение к

принятию приближенных решений. – М.: Мир, 1976. - 77 с.

17 Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MAELAB и fuzz-TECH. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003. – 736 с.

18 Dogan, E., Steg, L., & Delhomme, P. (2011). The influence of multiple goals on driving behavior: The case of safety, time saving, and fuel saving. *Accident Analysis & Prevention*, Volume 43 (Issue 5), pp. 1635-1643.

19 Xu, Y., Song, J., Nechyba, M. C., & Yam, Y. (2002). Performance evaluation and optimization of human control strategy. *Robotics and Autonomous Systems*, Volume 39 (Issue 1), pp. 19-36.

20 Van Mierlo, J., Maggetto, G., Van de Burgwal, E., & Gense, R. (2004). Driving style and traffic measures-influence on vehicle emissions and fuel consumption. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, Volume 218 (Issue 1), pp. 43-50.

21 Rafael, M., Sanchez, M., Muciño, V., & Cervantes, J. (2006). Impact of driving styles on exhaust emissions and fuel economy from a heavy duty truck: laboratory tests. *International Journal of Heavy Vehicle Systems*, Volume 218 (Issue 1), pp. 56-73.

22 Berry, I. M. (2010). The effects of driving style and vehicle performance on the real-world fuel consumption of US light-duty vehicles (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).

23 Яковлев, В., Могилат, В. & Тарасов, П. И. (2009). Причины аварийности на технологическом автотранспорте карьеров и пути ее снижения. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)* (Issue 1), pp. 211-217.

24 Hellström, E., Ivarsson, M., Åslund, J., & Nielsen, L. (2009). Lookahead control for heavy trucks to minimize trip time and fuel consumption. *Control Engineering Practice*, Volume 17 (Issue 2), pp. 245-254.

25 Hellström, E., Åslund, J., & Nielsen, L. (2010). Design of an efficient algorithm for fuel-optimal look-ahead control. *Control Engineering Practice*, Volume 18 (Issue 11), pp. 1318-1327.

26 Рутковский Л. 2010 Методы и технологии искусственного интеллекта. – Москва: Горячая линия-Телеком., С. 202-279.

27 F. Bobillo, U. Straccia. FuzzyDL: An expressive fuzzy description logic reasoned. // 2008 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (IEEE World Congress on Computational Intelligence)-2008.

28 S. Russell, P. Norvig. 2009. Artificial Intelligence: A Modern Approach, 3rd edition. // Prentice Hall.

29 C. Ramos, J. Augusto, D. Shapiro. Ambient Intelligence—the Next Step for Artificial Intelligence. // IEEE Intelligent Systems. #23. 2008. 15-18.

30 Ponce-Cruz P., Ramirez – Figueroa F.D., 2010. Intelligent control systems with Lab VIEW. – Berlin: Springer Verlag..

31 Сулейменов Б.А. 2009. Интеллектуальные и гибридные системы управления технологическими процессами. - Алматы. С.207-304.

32 D. Ramot, M. Friedman, G. Langholz, A. Kandel, “Complex fuzzy logic”//

IEEE Transactions on Fuzzy Systems,-№ 11-2003.

33 F. Bobillo, U. Straccia. FuzzyDL: An expressive fuzzy description logic reasoned. // 2008 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (IEEE World Congress on Computational Intelligence)-2008.

34 S. Russell, P. Norvig. Artificial Intelligence: A Modern Approach, 3rd edition. // Prentice Hall. – 2009.

35 A. Mayrhauser, R. France, M. Scheetz, E. Dahlman, Generating test-cases from an object-oriented model with an artificial-intelligence planning system.// IEEE Transactions on Reliability.№49-2000.

36 C. Lim, L. Jain. Advances in Swarm Intelligence. // INNOVATIONS IN SWARM INTELLIGENCE. №248., 2009. P. 1-7.

37 C. Ramos, J. Augusto, D. Shapiro. Ambient Intelligence—the Next Step for Artificial Intelligence.// IEEE IntelligentSystems. №23. 2008. 15-18.

38 S. Kalogirou. Artificial intelligence for the modeling and control of combustion processes: a review. -2003. 515-566.

39 Li Y., Ang K.H., Chong G.C.Y. Patens, software and hardware for PID control: an overview and analysis of the current art // IEEE Control System Magazine. - 2006.-V.26-№1.-P.42-54.

40 Методы современной теории автоматического управления // Учебник: в 5 т. – М.: МГТУ имени Н.Э. Баумана, 1988 -Т. 5. - 764 с.

41 Михеев А.М., Михеева И.М. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 2003. 254 с.

42 Вороненко Б.А., Крысин А.Г., Пеленко В.В. Аналитическое описание процесса нестационарной теплопроводности: Учеб. пособие. – Екатеринбург: Изд-во ИХиБТ, 2014. – 48 с.

43 Горбунов И.С. Моделирование теплообмена в конечно-элементном пакете FEMLAB: Учеб. пособие. – Иваново: Изд-во НиСТ, 2008. – 216 с.

44 Бирюлин, Г.В. Теплофизические расчёты в конечно-элементарном пакете COMCOL. – М.: ИТМО, 2006. – 76 с.

45 Шарма Дж. Н., Сингх К. Уравнения частных производных для инженеров. – М.: Техносфера, 2002. – 320 с.

46 Пратх В.А., Дмитриевский В.А., Сарапулов Ф.Н. Моделирование тепловых и электромагнитных процессов в электрических установках: Учеб. пособие. – Москва: Изд-во Спутник, 2011. – 258 с.

47 Потемкин. Нейронные сети MATLAB 6. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2002. – 496 с.

48 Мусабеков Н.Р., Ибраев А.Х. Математическое описание автогенных процессов плавки медных концентратов, протекающих в жидкой ванне // Труды Международных Сатпаевских чтений «Роль и место молодых ученых в реализации новой экономической политики Казахстана» – Алматы: КазНТУ, 2016. – Том II. – С.-79, ISBN 978-601-228-807-0

49 Nazarbek Mussabekov, Akhmet Ibraev, Kuanysh Moldakhmetov. Control system by technological complex on the example of the control process of copper concentrates smelting // Сборник статей Conference Lubelskie Dni Nauki i Biznesu WD 2016.

50 Мусабеков Н.Р., Ибраев А.Х., Молдахметов К.К. Разработка математических моделей для процесса плавки медных концентратов в печи Ванюкова // Сборник статей конференции «Европейская наука 21 века - 2016»

51 Мусабеков Н.Р., Ибраев А.Х., Адильбеков М.Ж. О вопросах разработки гибридной системы управления технологическим процессом на примере управления процессами теплообмена // ДОКЛАДЫ Национальной Академии Наук Республики Казахстан, 2016 г., №5. С.125-131. ISSN 2518-1483 (Online), ISSN 2224-5227 (Print) (БАК)

52 Nazarbek Mussabekov, Roman N. Kvyetnyy, Olexander N. Romanyuk, Evgenii O. Titarchuk, Konrad Gromaszek. Usage of the hybrid encryption in a cloud instant messages exchange system // SPIE Proceedings: Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments Vol 10031 (2016) (Scopus)

53 N.Mussabekov, A. Smolarz, W. Wójcik, K. Gromaszek, P. Komada, V.I. Lytvynenko. Artificial intelligence methods in diagnostics of coal-biomass blends co-combustion in pulverized coal burners // International journal Environmental Engineering V, Vol p. 311–318, ISBN: 978-1-138-03163-0 (2017) (Scopus)

54 N.Mussabekov, B.K. Mukhanov. Development of a mathematical model for a compound technological complex of vanyukov melting in order to control the material and thermal regime // Kompleksnoe Ispolzovanie Mineralnogo Syra = Complex Use of Mineral Resources, 2023. - 327(4). – P.15-22, ISSN-L 2616-6445, ISSN 2224-5243 (Web of Science)

55 Mussabekov N.R., Ibraev A. Kh. Methods and tools for development a hybrid and information control systems of technological complex // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences, 1(427), 2018. pp.118-126, ISSN: 2224-5278 (Scopus)

56 ГОСТ 21.404.-85. Система проектной документации для строительства. Обозначения условные приборов и средств автоматизации в схемах. – М.: Изд-во стандартов, 1985.

57 Горфинкаля В.Я., Швандара В.А. Экономика предприятия: Учеб. пособие. – Москва: Изд-во ЮНИТИ-ДАНА, 2003. – 384 с

58 Экономика и организация производства: Методические указания к выполнению расчетно-графических работ (для студентов всех форм обучения специальности 050702 – Автоматизация и управление) / С.Г. Парамонов. – Алматы: АУЭС, 2013. – 18 с.

59 Руководство по эксплуатации самописец PHL // RIZUR.RU: официальный сайт ООО «Ризур». 2018. URL: <http://www.rizur.ru/uploads/data/file/fuji/phl.pdf> (дата обращения: 02.03.2018).

60 Руководство по эксплуатации самописец RVG200 // NEW.ABB.COM: официальный сайт компании Asea Brown Boveri Ltd. 2018. URL: <https://www.new.abb.com/assets/ABB.RVG200.pdf> (дата обращения: 04.03.2018).

61 Руководство по эксплуатации самописец VR06 // BRAINCHILD.COM: официальный сайт компании BRAINCHILD. 2018. URL: <https://www.brainchild.com/catalog/products/VR06.pdf> (дата обращения: 010.03.2018).

62 Лист технических данных Rosemount 0065 // EMERSON.COM: официальный сайт корпорации Emerson Electronic. 2018. URL: <http://www.emerson.com/documents/automation/лист-технических-данных-термосопротивление-0065-0185.pdf> (дата обращения: 12.02.2018).

63 Manual Siemens SIMATIC S7-300 // SIEMENS.COM: official website of Siemens. 2018. URL: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/415/15390415/att_41918/v1/S7-300_IHB_e.pdf (дата обращения: 24.03.2018).

64 Руководство по эксплуатации вихревой расходомер Rosemount 8800D // EMERSON.COM: официальный сайт корпорации Emerson Electronic. 2018. URL: <http://www.emerson.com/documents/automation/00825-0107-4004.pdf> (дата обращения: 02.04.2018)

65 Руководство по эксплуатации ОВЕН НПТ-1 // OWEN.RU: официальный сайт компании ОВЕН. 2018. URL: http://www.owen.ru/uploads/npt-1_4.pdf (дата обращения: 10.04.2018).

66 Руководство по эксплуатации контроллера ABB AC 800M // NEW.ABB.COM: официальный сайт компании Asea Brown Boveri Ltd. 2018. URL: https://www.new.abb.com/library/ABB_AC_800M.pdf (дата обращения: 11.04.2018).

67 ГОСТ 8961.-73. Изделия огнеупорные общего назначения. Форма и размеры. – М.: Изд-во стандартов, 1973.

ПРИЛОЖЕНИЕ А – Экспериментальные данные

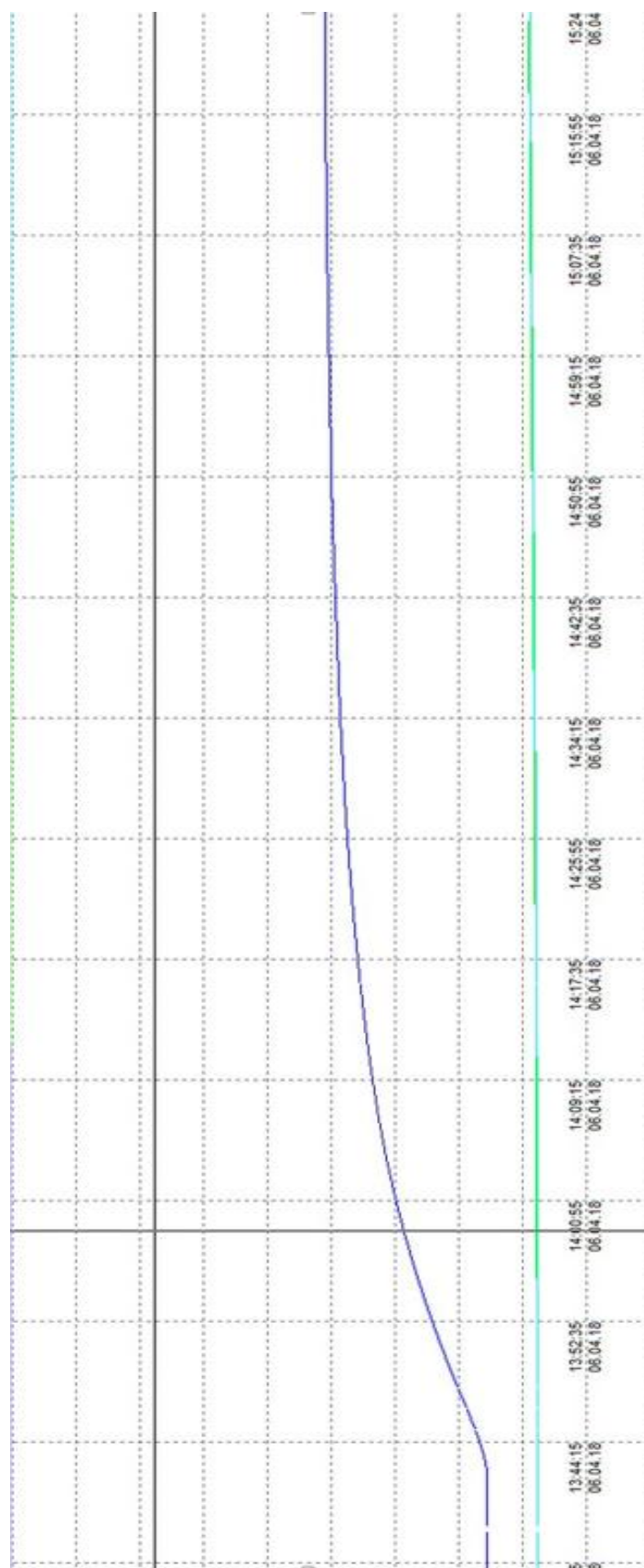


Рисунок А.1 – График нагрева шамотного кирпича

Таблица А.1 – Значения температуры шамотного кирпича

Дата	Тем-ра 1, °C	Тем-ра 2, °C	Тем-ра 3, °C	Дата	Тем-ра 1, °C	Тем-ра 2, °C	Тем-ра 3, °C
13:27:16	20,8	20,8	20,8	14:06:16	175,2	25,4	25,4
13:28:16	20,8	20,8	20,8	14:07:16	178,8	25,5	25,5
13:29:16	20,8	20,9	20,9	14:08:16	182,1	25,7	25,7
13:30:16	20,8	21	21	14:09:16	185,2	25,8	25,8
13:31:16	20,8	21,2	21,2	14:10:16	188,2	25,9	25,9
13:32:16	20,8	21,2	21,2	14:11:16	191	26,1	26,1
13:33:16	20,7	21,2	21,2	14:12:16	193,7	26,2	26,2
13:34:16	20,7	21,4	21,4	14:13:16	196,3	26,4	26,4
13:35:16	20,7	21,5	21,5	14:14:16	198,7	26,5	26,5
13:36:16	20,7	21,6	21,6	14:15:16	201,1	26,6	26,6
13:37:16	20,7	21,8	21,8	14:16:16	203,4	26,8	26,8
13:38:16	20,7	21,8	21,8	14:17:16	205,5	27	27
13:39:16	20,7	21,8	21,8	14:18:16	207,6	27	27
13:40:16	20,7	21,9	21,9	14:19:16	209,6	27,2	27,2
13:41:16	20,8	22	22	14:20:16	211,5	27,4	27,4
13:42:16	22,3	22,1	22,1	14:21:16	213,3	27,6	27,6
13:43:16	26,4	22,2	22,2	14:22:16	215	27,8	27,8
13:44:16	32,8	22,3	22,3	14:23:16	216,7	28	28
13:45:16	40,5	22,5	22,5	14:24:16	218,4	28,2	28,2
13:46:16	48,8	22,6	22,6	14:25:16	219,9	28,4	28,4
13:47:16	57,5	22,8	22,8	14:26:16	221,4	28,6	28,6
13:48:16	66,1	22,9	22,9	14:27:16	222,8	28,8	28,8
13:49:16	74,6	23	23	14:28:16	224,1	29,1	29,1
13:50:16	82,8	23,2	23,2	14:29:16	225,3	29,3	29,3
13:51:16	90,7	23,3	23,3	14:30:16	226,5	29,5	29,5
13:52:16	98,3	23,5	23,5	14:31:16	227,7	29,7	29,7
13:53:16	105,6	23,7	23,7	14:32:16	228,8	29,9	29,9
13:54:16	112,6	23,8	23,8	14:33:16	229,9	30,2	30,2
13:55:16	119,3	23,9	23,9	14:34:16	231	30,4	30,4
13:56:16	125,8	24,1	24,1	14:35:16	232	30,6	30,6
13:57:16	132	24,2	24,2	14:36:16	232,9	30,9	30,9
13:58:16	137,9	24,3	24,3	14:37:16	233,7	31,1	31,1
13:59:16	143,5	24,5	24,5	14:38:16	234,5	31,3	31,3
14:00:16	148,9	24,6	24,6	14:39:16	235,3	31,6	31,6
14:01:16	153,9	24,8	24,8	14:40:16	236	31,8	31,8
14:02:16	158,6	24,9	24,9	14:41:16	236,8	32,1	32,1
14:03:16	163,2	25	25	14:42:16	237,7	32,3	32,3

Приложение Б - Результаты моделирования в Comsol Multiphysics

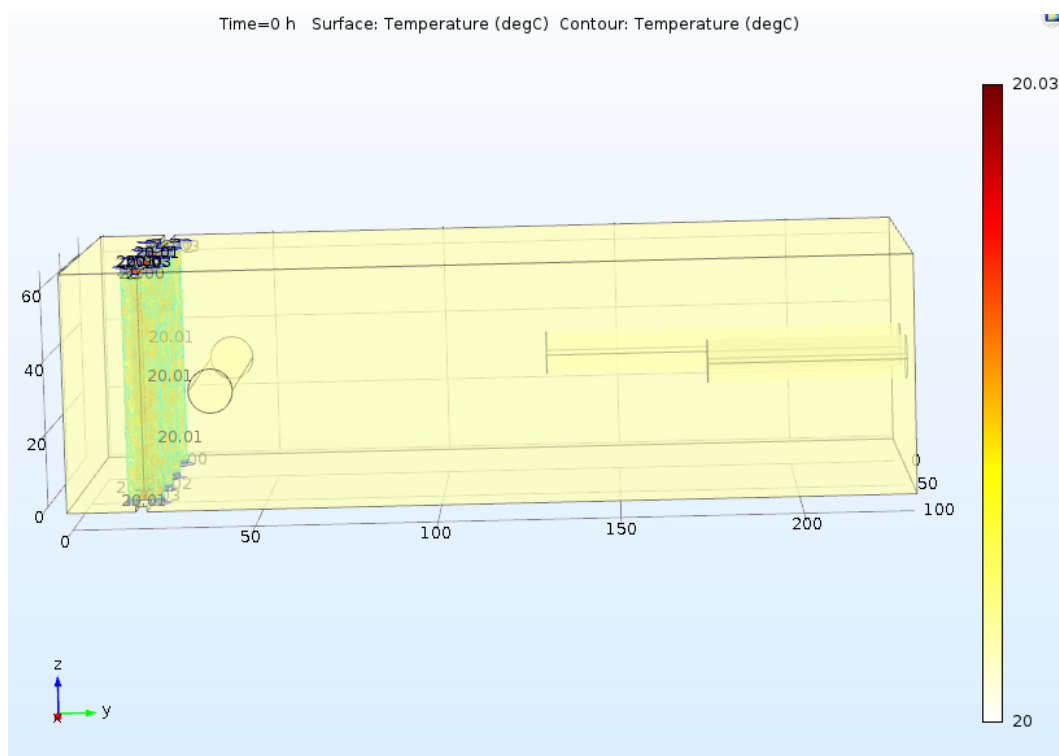


Рисунок Б.1 – Начало моделирования

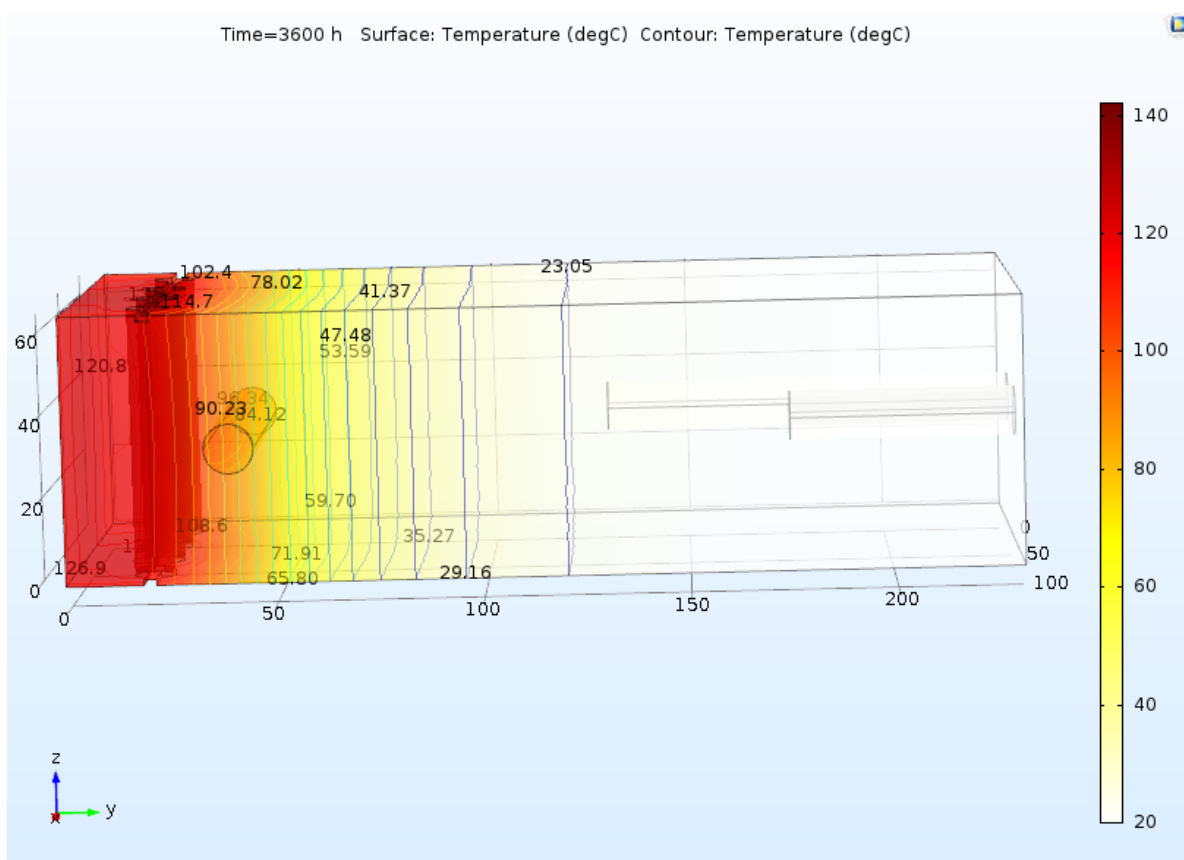


Рисунок Б.2 – Моделирование на $t=1000$ с

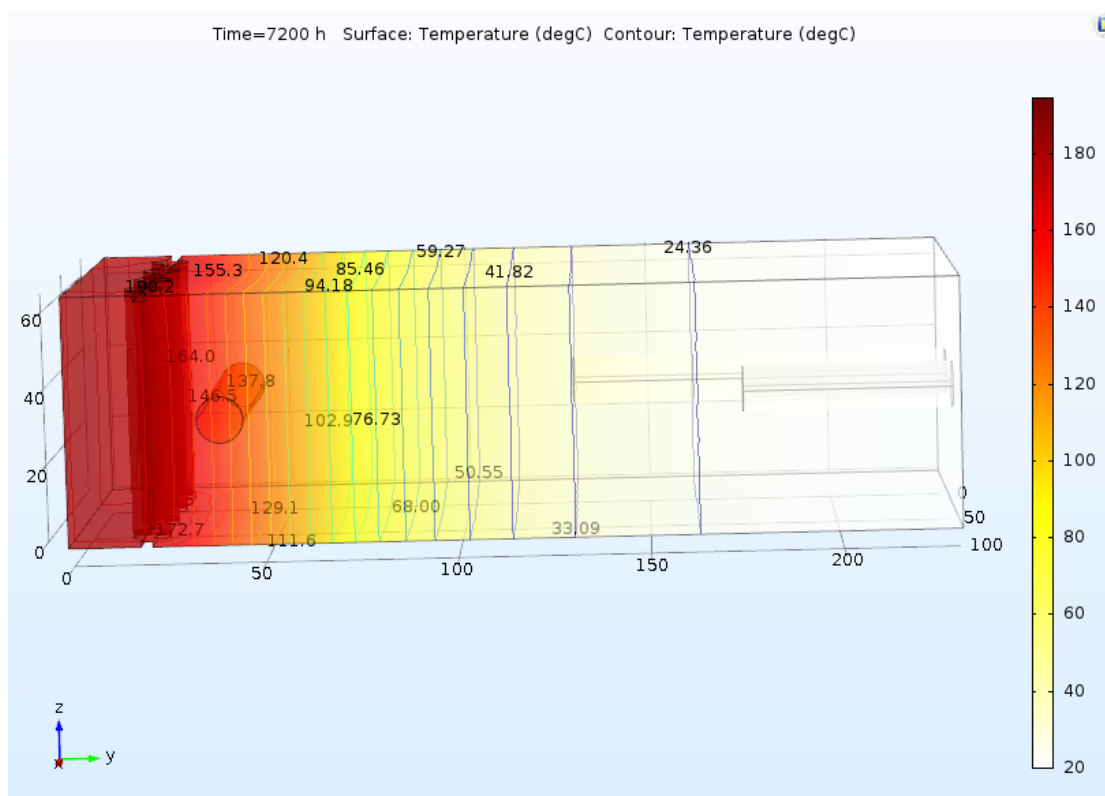


Рисунок Б.3 – Моделирование на $t=2000$ с

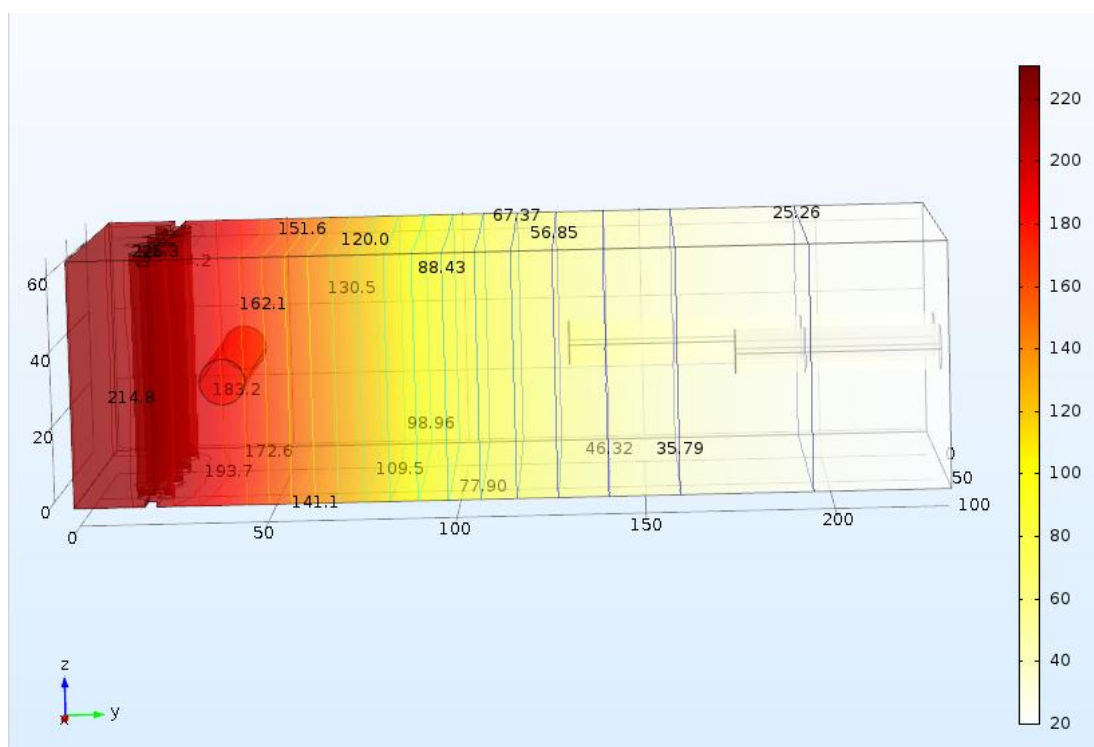


Рисунок Б.4 – Моделирование на $t=3000$ с

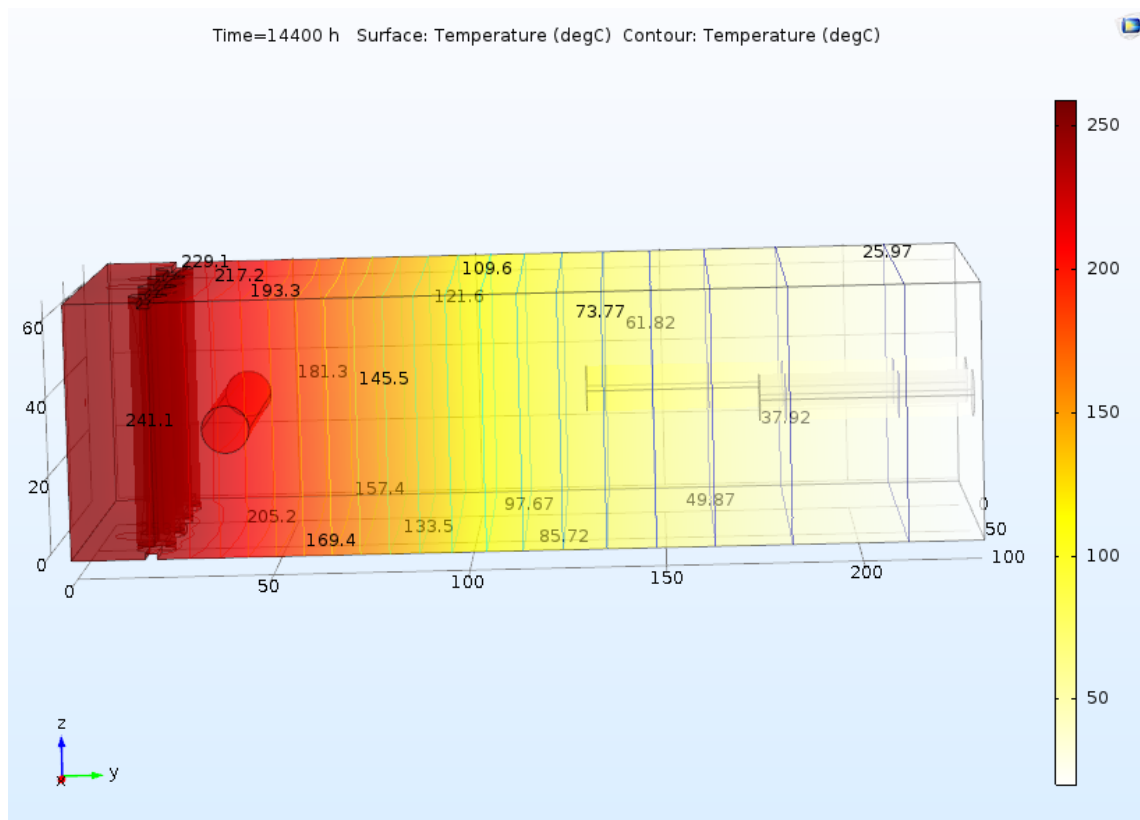


Рисунок Б.5 – Моделирование на $t=4000$ с

Приложение В - Результаты эксперимента нагрева шамотного кирпича, при перепадах температуры

Таблица В.1 – Значения температуры шамотного кирпича

Дата	Тем-ра 1, °C	Тем-ра 2, °C	Тем-ра 3, °C	Дата	Тем-ра 1, °C	Тем-ра 2, °C	Тем-ра 3, °C
13:27:16	34,7	25,4	25,4	14:06:16	240,8	45,3	45,3
13:28:16	34,8	25,4	25,4	14:07:16	240,8	45,3	45,3
13:29:16	34,9	25,4	25,4	14:08:16	240,8	45,3	45,3
13:30:16	35	25,4	25,4	14:09:16	240,8	45,3	45,3
13:31:16	35,1	25,4	25,4	14:10:16	240,9	45,3	45,3
13:32:16	35,2	25,4	25,4	14:11:16	240,8	45,3	45,3
13:33:16	35,3	25,4	25,4	14:12:16	240,9	45,3	45,3
13:34:16	35,5	25,4	25,4	14:13:16	240,9	45,3	45,3
13:35:16	35,5	25,4	25,4	14:14:16	240,8	43,8	43,8
13:36:16	35,7	25,4	25,4	14:15:16	240,6	43,8	43,8
13:37:16	35,8	25,4	25,4	14:16:16	240,6	43,8	43,8
13:38:16	35,9	25,4	25,4	14:17:16	240,5	43,8	43,8
13:39:16	36	25,4	25,4	14:18:16	240,4	43,8	43,8
13:40:16	36,1	25,4	25,4	14:19:16	240,3	43,8	43,8
13:41:16	36,2	25,4	25,4	14:20:16	240,2	43,8	43,8
13:42:16	36,3	25,4	25,4	14:21:16	240,1	43,8	43,8
13:43:16	36,5	25,4	25,4	14:22:16	240	43,8	43,8
13:44:16	36,6	25,4	25,4	14:23:16	239,9	43,8	43,8
13:45:16	36,7	25,4	25,4	14:24:16	239,8	43,8	43,8
13:46:16	36,8	25,4	25,4	14:25:16	239,7	43,8	43,8
13:47:16	36,9	25,4	25,4	14:26:16	239,6	43,8	43,8
13:48:16	37	25,4	25,4	14:27:16	239,5	43,8	43,8
13:49:16	37,2	25,4	25,4	14:28:16	239,4	43,8	43,8
13:50:16	37,3	25,4	25,4	14:29:16	239,3	43,8	43,8
13:51:16	37,4	25,5	25,5	14:30:16	239,2	43,8	43,8
13:52:16	37,5	25,5	25,5	14:31:16	239,1	43,8	43,8
13:53:16	37,6	25,4	25,4	14:32:16	239	43,8	43,8
13:54:16	37,8	25,4	25,4	14:33:16	238,9	43,8	43,8
13:55:16	37,9	25,5	25,5	14:34:16	238,8	43,8	43,8
13:56:16	38	25,4	25,4	14:35:16	238,7	43,8	43,8
13:57:16	38,1	25,5	25,5	14:36:16	238,6	43,8	43,8
13:58:16	38,2	25,5	25,5	14:37:16	238,5	43,8	43,8
13:59:16	38,4	25,5	25,5	14:38:16	238,4	43,8	43,8
14:00:16	38,5	25,5	25,5	14:39:16	238,3	43,8	43,8
14:01:16	38,6	25,5	25,5	14:40:16	238,2	43,8	43,8
14:02:16	38,7	25,5	25,5	14:41:16	238,1	43,8	43,8
14:03:16	38,8	25,5	25,5	14:42:16	238	43,8	43,8

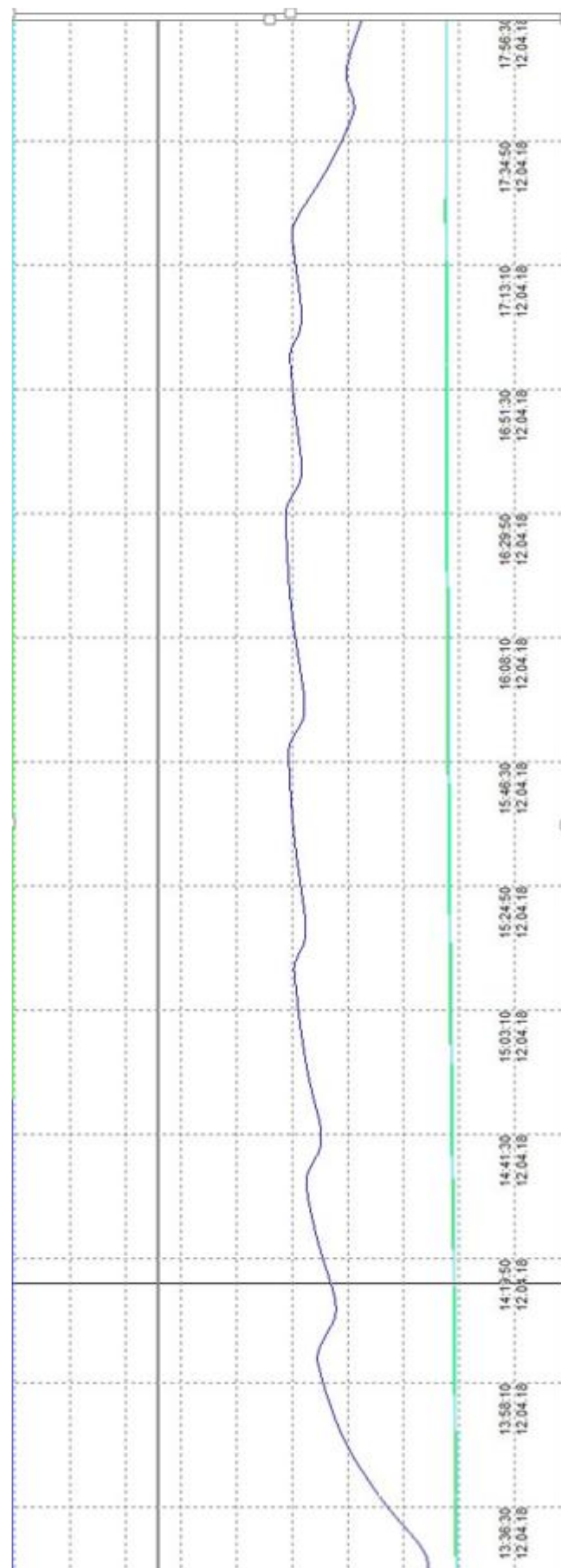


Рисунок В.1 – График нагрева шамотного кирпича

ПРИЛОЖЕНИЕ Г – Акт внедрения результатов диссертации



Жауапкершілігі Шектеулі Серіктестігі
Товарищество с Ограниченной Ответственностью
Limited Liability Company
БИН 050 440 006 061

Исх. № 07/05-25 от 16 мая 2025г.

АКТ

о внедрении научных результатов диссертационной работы PhD докторанта Казахского национального исследовательского технического университета имени К.И. Сатпаева, Мусабекова Назарбека Расулбековича на тему: «Синтез гибридной системы управления сложным технологическим комплексом медеплавильного производства», представленный на соискание степени доктора PhD по образовательной программе «6D070200 Автоматизация и управление»

Мы, нижеподписавшиеся, составили настоящий акт о том, что результаты научно-исследовательской работы PhD докторанта Казахского национального исследовательского технического университета имени К.И. Сатпаева, специальности «6D070200 Автоматизация и управление» Мусабекова Н.Р. по теме: «Синтез гибридной системы управления сложным технологическим комплексом медеплавильного производства» были реализованы в управлении технологических процессах производственного комплекса ПЖВ. Кроме того результаты исследований и разработки методов и средств, позволяют создавать интеллектуальные и гибридные системы управления для сложных химико-металлургических технологических процессов, применительно к плавке Ванюкова, которые будут способствовать ее распространению на отечественные и зарубежные предприятия цветной металлургии.

Получены результаты, позволяющие получить надежный (проверенный на практике) инструмент создания интеллектуальных и гибридных систем оптимального управления сложными технологическими процессами, который может использоваться для разработки аналогичных систем для различных технологических объектов в разных сферах экономики Казахстана и мира.



Хат-хабарға:
050031, КР, Алматы қаласы,
Толө би көшесі, 305/1
Тел. (727) 33 95 735
(727) 33 95 734
(727) 33 95 733
E-mail: info@verbulak.kz
www.verbulak.kz

Для корреспонденции:
050031, РК, г. Алматы,
ул. Толө би, 305/1
Тел. (727) 33 95 735
(727) 33 95 734
(727) 33 95 733
E-mail: info@verbulak.kz
www.verbulak.kz

For correspondence:
305/1, Tole bi str., Almaty,
Republic of Kazakhstan, 050031
Tel. (727) 33 95 735
(727) 33 95 734
(727) 33 95 733
E-mail: info@verbulak.kz
www.verbulak.kz

ПРИЛОЖЕНИЕ Г – Акт внедрения результатов диссертации



Была разработана физическая модель в программе Comsol Multiphysics, которая отражает основные свойства реального объекта, а именно процесса прогнозирования температуры в зоне аптейка печи, где процесс измерения температуры является очень трудоемким. В результате проведения экспериментов были получены исходные данные для реализации математической модели и для проведения дальнейших экспериментов на нейросети.

Директор ТОО «VerBulak»

Докторант PhD



А.И. Прокофьев

Н.Р. Мусабеков

ПРИЛОЖЕНИЕ Д – Справка о выполнении научно-экспериментальных работ диссертационных исследований



LUBLIN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
Faculty of Electrical Engineering & Computer Science
Institute of Electronics and Information Technology

ul. Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin, Poland; tel.: +48 81 538 43 09; fax: +48 81 538 43 12; e-mail: ieti@pollub.pl; http://ieti.pollub.pl



СПРАВКА

о выполнении экспериментальных работ диссертационного исследования
докторанта 2-го года обучения специальности 6D070200 – Автоматизация и
управление

НАО «КазННТУ им. К.И. Сатпаева»

Мусабекова Назарбека Расулбековича

по теме: «Разработка гибридной системы управления сложным технологическим комплексом»

Данная справка подтверждает, что в период прохождения 2 научной стажировки с 07.06.2016г. по 08.07.2016г. в Люблинском техническом университете (г. Люблин, Польша) докторантом Мусабековым Н.Р. проведены следующие научно-исследовательские работы диссертационного исследования:

1. Проведены теоретические исследования по определению классов задач и предложению структуры математических и интеллектуальных моделей управления технологическими процессами комплекса;

2. Разработана концепция создания гибридной системы управления технологическим комплексом. Проведена декомпозиция общей задачи управления комплексом и сформулирована постановка задачи управления отдельными переделями и комплексом в целом. Разработана методика проведения экспериментальных исследований и на их основе составлена структура получения математических и интеллектуальных моделей и алгоритмов управления отдельных процессов технологического комплекса для целей управления и возможностей применения «виртуальных датчиков» для расширения объемов информации используемых экспертами при принятии решений;

3. Проведен анализ переменных, влияющих на принятие решений по управлению процессом, предложена структура решающих правил и интеллектуальных моделей для выбора предпочтений;

4. Проведены экспериментальные исследования и на их основе выполнена параметрическая идентификация математических моделей, синтезированы экспертные заключения по выбору решений и получению математических и интеллектуальных моделей и алгоритмов управления технологическим комплексом;

5. Проведен факторный эксперимент для сбора данных по принятию решений экспертами, проведены натурные экспериментальные исследования процессов на экспериментальной и промышленной установках в г. Люблине, Польша;

6. Получены результаты вычислительного эксперимента, позволившего оценить качество исследования математических моделей и возможности использования их для управления процессами на примере ТК ПВ, а также провести интеграции подходов к управлению технологическим комплексом ТК ПВ, разработать алгоритмическую и программную реализацию гибридной системы управления.

В результате исследований собраны экспериментальные данные по технологическому процессу в виде электронных таблиц, разработанных в программной среде Excel. Накопленный материал может быть использован для создания и внедрения в практику гибридной системы управления сложным технологическим комплексом.

Зарубежный научный руководитель
д.т.н., профессор

Andrzej Smolarz

POLITECHNIKA LUBELSKA
Instytut Elektroniki i Technik Informacyjnych
20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 38A
tel. (81) 53 84 309; fax. (81) 53 84 312