

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ ДНР
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

На правах рукописи



Ткаченко Анна Евгеньевна

УДК 697.326:622.933

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭКОНОМИЧЕСКОЙ
ЭФФЕКТИВНОСТИ КОТЛОАГРЕГАТОВ С
НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫМ КИПАЩИМ СЛОЕМ СИСТЕМ
ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ШАХТ**

**05.23.03 – теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха,
газоснабжение и освещение**

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:

к.т.н., доцент

Гавриленко Борис Владимирович



Идентичность всех экземпляров заверяю

Ученый секретарь диссертационного

совета Д 01.005.01,

к.т.н., доцент



З.В. Удовиченко

Донецк – 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
Глава 1. Состояние вопроса. Цель и задачи исследования	13
1.1 Технологические особенности шахтной системы теплоснабжения.....	13
1.2 Топки низкотемпературного кипящего слоя как источники теплоты в системе теплоснабжения шахты.....	22
1.3 Обзор научных работ в области повышения эффективности систем теплоснабжения и работы котлоагрегатов с НТКС	33
1.4 Обоснование принятого направления разработок. Методы исследования.....	39
Глава 2. Исследование процесса производства теплоты в шахтной системе теплоснабжения котлоагрегатами с НТКС.....	41
2.1 Структурная идентификация системы теплоснабжения шахты.....	41
2.2 Идентификация и моделирование производства теплоты котлоагрегатом с НТКС	46
2.3 Исследование работы котлоагрегата с НТКС в среде MATLAB.....	63
2.4 Выводы по второй главе.....	70
Глава 3. Экспериментальное исследование работы котлоагрегата с НТКС.....	71
3.1 Методика проведения эксперимента и обработки результатов исследований работы топки НТКС.....	71
3.2 Идентификация передаточных функций структурных звеньев котлоагрегата с НТКС по результатам эксперимента.....	75
3.3 Выводы по третьей главе.....	79
Глава 4. Разработка метода расчета рационального состава и производительности группы котлоагрегатов с НТКС.....	80
4.1 Обоснование критериев рациональной работы группы котлоагрегатов с НТКС.....	80
4.2 Определение вида зависимости производительности котлоагрегата от его КПД методом теплового баланса.....	85

4.3 Разработка метода расчета рационального состава группы котлоагрегатов с НТКС и производительности каждого котла	90
4.5 Выводы по четвертой главе.....	101
Глава 5 Конструктивная разработка системы автоматического управления производством теплоты в системе теплоснабжения шахты.....	102
5.1 Обзор современных технических решений по автоматизации котлоагрегатов с НТКС.....	102
5.2 Разработка структуры системы автоматизации группы котлоагрегатов с НТКС.....	104
5.3 Разработка принципиальной схемы блока согласования технологических датчиков с регулятором системы автоматизации котлоагрегата с НТКС.....	114
5.4. Экономическое обоснование эффективности внедрения системы автоматического управления производительностью котлоагрегатов с НТКС	120
5.6 Выводы по пятой главе.....	123
Основные выводы по работе.....	125
Список литературы.....	127
Список сокращений и условных обозначений.....	143
Приложение А Параметры математической модели котлоагрегата с НТКС....	151
Приложение Б Методика экспериментальных исследований	157
Приложение В Обработка результатов экспериментальных исследований.....	165
Приложение Г Листинг прогнозного расчета в среде MathCad теплопотребления шахты.....	173
Приложение Д Листинг программной реализации методики расчета рационального состава и производительности группы котлоагрегатов с топками НТКС в среде MatLab.....	176
Приложение Е Перечень элементов принципиальной схемы блока согласования.....	183
Приложение Ж Справки о внедрении результатов диссертационного исследования.....	184

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Снижение себестоимости производства теплоты для снабжения промышленных предприятий, в том числе и шахт, на сегодняшний день является важной и актуальной задачей. Ее решению препятствует использование низкоэффективных теплогенерирующих установок и дорогих видов топлив [74]. Кроме того, применяемая на данный момент практика расчета требуемого отпуска теплоты на предприятии по укрупненным и усредненным показателям и отказ от прогнозного управления производительностью котельных агрегатов приводят к фактам значительного перепроизводства теплоты и отсутствию возможности своевременно реагировать на резкие изменения абонентского спроса. Проблема оперативного регулирования производительности теплогенерирующих установок особенно актуальна для таких промышленных предприятий как шахты, системы теплоснабжения которых характеризуются рядом специфических особенностей: тепломагистрали большой протяженности; локальное теплоснабжение от собственной котельной установки по одноступенчатой схеме; использование нескольких теплогенерирующих, как правило, водогрейных установок; периодические суточные колебания нагрузки на горячее водоснабжение и отопление с амплитудой в 5-6 МВт ввиду графика работы шахты в четыре смены, что сопоставимо с тепловой мощностью котельного агрегата; наличие среди тепловых абонентов калориферной установки, потребителя, характеризуемого большой потребляемой тепловой мощностью до 12 МВт на вентиляцию и отсутствием теплоаккумулирующей способности. Тепловой спрос шахтной калориферной установки нужно удовлетворять оперативно, в противном случае снижение температуры воздуха, подаваемого в шахту, ниже 2°C приводит к обмерзанию ствола шахты и остановке работы предприятия.

Наиболее распространенные на данный момент в качестве источников теплоты на шахтах слоевые топki имеют существенные недостатки, в том числе низкий КПД, невозможность полной автоматизации их работы и оперативного

регулирования производительности, длительный розжиг, требование к зольности топлива не выше 40%. Поэтому, с учетом тенденции последних десятилетий к удорожанию добычи [113] и снижению качества каменноугольного топлива [103] (содержание золы в добытых углях достигает 35%), целесообразно в качестве источников теплоты на шахтах применять котлы с топками низкотемпературного кипящего слоя (НТКС). Данная технология, по сравнению со слоевым сжиганием, имеет следующие преимущества: способность сжигать угли с зольностью до 70% [31], используя некондиционный уголь шахты, КПД котлоагрегатов может достигать 83%, имеется возможность вывода топки НТКС в «горячий резерв», из которого кипящий слой возвращается в рабочее состояние максимум за 30 мин, возможность полной автоматизации работы топки, наличие нескольких способов оперативного регулирования ее производительности.

Применение в качестве источников теплоты в системах теплоснабжения горных предприятий котлов с топками НТКС является актуальным решением проблемы повышения эффективности процесса производства теплоты. Разработка критериев и методики поиска рациональной производительности котлоагрегатов с НТКС, работающих в группе на тепловую сеть шахты имеет большой научный и практический интерес, что и определило выбор темы диссертационной работы.

Степень разработанности темы.

Фундаментальные исследования технологии сжигания твердого топлива в НТКС, а также предложения по повышению ее эффективности отражены в работах таких ученых Института угольных технологий НАН Украины как О.Ю. Майстренко, Ю.П. Корчевой, Н.В. Чернявский [76, 86, 87], Донецкого национального технического университета – В.В. Кравцова [79], Ж.В. Вискина [31], украинских исследователей – К.Е. Махорин, П.А.Хинкис, белорусских ученых – В.А. Бородуля, Ю.П. Гупало [27, 28], а также зарубежных авторов R. Baron, J. Hodges, S. Oka, Volker Hassel [2, 14, 19, 88] и др.

Специфика автоматического управления процессами производства и распределения теплоты в системах теплоснабжения коммунальных и промышленных предприятий исследована в работах Г.К. Вороновского [32, 33],

Ю.М. Паночишина [93 – 95], А.П. Федорова [133], Б.А. Коренного, Р. Батинича, Д.Е. Адрианова [21], А.А. Рымкевича [110], А.Г.Сотникова [116], Б.А. Кутнего [80 – 82], А.В. Софиева [117], Б.В. Гавриленко, С.В. Неежмакова [34 – 45, 90].

В работах таких авторов, как Д.В. Жуков, В.З. Дмитриев [63], М.Е. Орлов [92], А.С. Семиненко, Е.А. Александрова [23], А.С. Солдатенков [115], И.Ю. Козлова, Л.И. Лисенко [75], Т. Al- Shemmeri [1], J. Mitchell [10], Soteris Kalogirou [15] приведены исследования в сфере повышения эффективности теплоснабжения.

Как показал анализ современных публикаций, вопросы энергоэффективности системы теплоснабжения шахты на данный момент являются малоизученными. Сделан вывод, что на данный момент не существует комплексной математической модели системы теплоснабжения шахты, которая бы учитывала специфику таких источников теплоты, как группа топок НТКС, а также специфику изменения теплового спроса шахтных потребителей. Также не существует эффективной методики определения рациональных режимов функционирования шахтного комплекса теплоснабжения с топками НТКС. Решение этих вопросов имеет большой научный и практический интерес.

Цель работы – повышение эффективности производства теплоты котлоагрегатами с топками НТКС в шахтной системе теплоснабжения с помощью автоматического расчета и обеспечения рациональных режимов работы группы котлов.

Задачи исследования:

- провести аналитическое исследование технологических особенностей работы котлов с топками НТКС и их применения в системе теплоснабжения горного предприятия;
- разработать математическую модель производства и распределения материальных и энергетических потоков в котлоагрегате с топкой НТКС для расчета значений технологических параметров топок и прогноза поведения слоя при различных комбинациях управляющих воздействий при переходе с одного режима на другой;

- провести экспериментальные исследования режимов работы топки НТКС при различных способах регулирования ее производительности;
- обосновать критерий оценки эффективности работы группы котлоагрегатов с НТКС, позволяющий комплексно учесть экономические показатели их работы, а также теплотехнические характеристики каждого котельного агрегата;
- обосновать и разработать метод поиска рационального состава группы котельных агрегатов с топками НТКС, находящихся в работе, и производительности каждого котла в зависимости от прогнозного теплового спроса абонентов шахты; на основании данного метода разработать методику расчетов;
- разработать структуру и алгоритм работы многоуровневой системы автоматического управления производством теплоты в шахтной системе теплоснабжения, а также ее техническую реализацию;
- оценить технико-экономическую эффективность от внедрения разработанной многоуровневой системы автоматического управления производством теплоты в шахтной системе теплоснабжения с котлоагрегатами с НТКС.

Объект исследования – котлоагрегаты с топками НТКС в системе теплоснабжения шахты.

Предмет исследования – закономерности производства теплоты котлоагрегатами с НТКС при их работе в группе в тепловой сети шахты.

Научная новизна полученных результатов:

- усовершенствована математическая модель производства и распределения материальных и энергетических потоков в котлоагрегате с топкой НТКС, при этом впервые учтено наличие погружных поверхностей нагрева и их параметры. На основании предложенной модели возможно рассчитывать значения технологических параметров котлоагрегатов, а также прогнозировать поведение кипящего слоя при различных комбинациях

управляющих воздействий при переходе топки НТКС с одного режима на другой;

- впервые научно обоснован критерий с наложенными ограничениями рациональной работы группы котельных агрегатов с топками НТКС по максимальному средневзвешенному КПД группы котлов с учетом текущего состояния каждого котлоагрегата, что позволяет комплексно учесть экономические показатели их работы, а также теплотехнические характеристики каждого котла;
- впервые разработан метод поиска рационального состава группы работающих котельных агрегатов с топками НТКС и рациональной производительности каждого котла в зависимости от прогнозируемого теплового спроса, который позволяет в динамическом режиме рассчитывать требуемые значения технологических параметров котлоагрегатов в соответствии с критерием максимального средневзвешенного КПД котельной.

Теоретическая и практическая значимость.

Теоретическая значимость результатов исследований:

- разработана модель производства и распределения материальных и энергетических потоков в котлоагрегате с НТКС, которая позволяет рассчитывать значения технологических параметров котельных агрегатов, а также поведение НТКС в переходных режимах в зависимости от изменения задания по тепловой производительности;
- экспериментальное исследование работы топок НТКС при различных управляющих воздействиях позволило уточнить зависимости тепловой производительности котлоагрегата от расхода твердого топлива и расхода дутьевого воздуха, что отражено в разработанной математической модели;

Практическая значимость результатов исследований:

- обоснована целесообразность внедрения в промышленную эксплуатацию схем теплоснабжения шахт с группой котлоагрегатов с топками НТКС в

качестве источников теплоты при проектировании и реконструкции систем теплоснабжения горных предприятий;

- разработана методика поиска рационального состава группы котлоагрегатов с топками НТКС и производительности каждого котла на основе предложенной математической модели. Разработанный по этой методике программный комплекс позволяет в оперативном режиме рассчитывать задания по тепловой производительности котельных агрегатов и соответствующие значения их технологических параметров в зависимости от прогнозируемого изменения теплового спроса потребителей;
- разработаны структура и алгоритм функционирования системы автоматического управления производством теплоты в системе теплоснабжения шахты. Предложена техническая реализация системы и рекомендации относительно ее эффективной эксплуатации;
- разработанные модели и методы приняты к использованию ГУ «Донгипрошахт» (г. Донецк) при составлении технических проектов модернизации котельных установок угольных шахт;
- разработанные модели и методы внедрены в учебный процесс при чтении курсов лекций по дисциплинам «Котельные установки промышленных предприятий», «Автоматизация технологических процессов и производств» для студентов направления подготовки 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств» и «Идентификация и моделирование технологических объектов» для студентов направления подготовки 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств», специальности 21.05.04 «Горное дело» (специализация №10 «Электрификация и автоматизация горного производства», а также при чтении курса лекций по дисциплине «Теплоснабжение» для студентов направления 08.03.01 «Строительство» профиль «Теплогазоснабжение и вентиляция».

Методология и методы исследований. В процессе выполнения работы автором был применен системный подход к анализу тепловых процессов,

протекающих в котлоагрегатах с НТКС, моделированию производства и распределения энергетических потоков в системе теплоснабжения шахты. Также в работе применялась методология имитационного компьютерного моделирования. В ходе выполнения расчетно-аналитических вычислений применялся численный метод случайного поиска и статистические методы обработки результатов эксперимента.

Личный вклад соискателя. Все результаты и положения, составляющие основное содержание диссертации, вынесенные на защиту, получены автором самостоятельно.

Основные положения, выносимые на защиту:

- обоснование технологических особенностей группы котлоагрегатов с топками НТКС, позволяющих эффективно использовать их в качестве теплогенерирующих установок систем теплоснабжения шахт;
- математическая модель производства и распределения материальных и энергетических потоков в котлоагрегате с топкой НТКС с возможностью учета наличия и параметров погружных поверхностей нагрева;
- критерий рациональной работы по максимальному средневзвешенному КПД группы котлоагрегатов с НТКС на тепловую сеть шахты;
- метод расчета эффективного состава группы котлоагрегатов с топками НТКС и производительности каждого котла по критерию максимального средневзвешенного КПД котельной.

Связь работы с научными программами, планами, темами.

Тема диссертационной работы и полученные результаты отвечают проблематике научно-исследовательских работ, которые выполнялись в Донецком национальном техническом университете. Диссертационная работа была выполнена в рамках госбюджетных НИР Н-21-2000 «Исследование шахтных теплоэнергетических процессов и создание систем управления», Н-20-05 «Разработка системы автоматического управления комплексом теплоснабжения с котлоагрегатами низкотемпературного кипящего слоя в условиях переменного расхода теплоносителя» и Н-12-17 «Исследование особенностей комплекса

теплоснабжения шахты с топками низкотемпературного кипящего слоя и синтез системы автоматического управления производством и распределением тепла», в которых автор принимал непосредственное участие и был ответственным исполнителем.

Степень достоверности и апробации результатов диссертационной работы.

Достоверность результатов исследований подтверждается использованием основополагающих положений теории теплообмена, современных методов математического моделирования, а также адекватностью результатов экспериментальных исследований. Достоверность обеспечивается также широкой публикацией работ по данной теме и обсуждением их на конференциях различного уровня.

Результаты диссертационных исследований доложены, обсуждены и одобрены на:

- XX и XXI Международных научных конференциях «Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-20» и «Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-21» (г. Ярославль, 2007 г. и г. Саратов, 2008 г.);
- XV и XVI Международных научных конференциях аспирантов и студентов «Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых» (г. Донецк, ГОУ ВПО «ДонНТУ», 2015 – 2016 гг.);
- Международных молодежных научных конференциях «Севергеоэкотех-2015», «Севергеоэкотех-2016», «Севергеоэкотех-2017», (г. Ухта, 2015 – 2017 гг.);
- Международной заочной научно-практической конференции «Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика» (г. Воронеж, 2015 г.);
- VIII Республиканской научно-практической конференции «Современное строительство и архитектура. Энергосберегающие технологии» (Приднестровская Молдавская Республика, г. Бендеры, 2016 г.);
- II Международная научно-техническая конференция «Энергетические системы» (г. Белгород, 2016 г.).

Публикации. Основные научные результаты диссертации опубликованы в 21 печатной работе, общим объемом 6,75 а. л., лично автором – 5,64 а. л., в том числе 6 работ в изданиях, входящих в перечень специализированных научных изданий, утвержденный Министерством образования и науки Украины; 3 работы в изданиях, входящих в перечень специализированных научных изданий, утвержденный Министерством образования и науки ДНР; 1 – в других изданиях; 11 – по материалам конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка использованных источников из 138 позиций, 6 приложений. Общий объем диссертации составляет 187 страницы машинописного текста. Из них 107 страниц основного текста, 27 полных страниц с рисунками и таблицами, 16 страниц списка использованных источников, 37 страниц приложений.

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Технологические особенности шахтной системы теплоснабжения

Снижение себестоимости производства теплоты для снабжения промышленных предприятий, в том числе и шахт, на сегодняшний день является важной и актуальной задачей. Ее решению препятствует использование низкоэффективных теплогенерирующих установок и дорогих видов топлив. Кроме того, применяемая на данный момент практика расчета требуемого отпуска теплоты на предприятии по укрупненным и усредненным показателям и отказ от прогнозного управления производительностью котельных агрегатов приводят к фактам значительного перепроизводства теплоты и отсутствию возможности своевременно реагировать на резкие изменения абонентского спроса.

Проблема оперативного регулирования производительности теплогенерирующих установок особенно актуальна для таких промышленных предприятий, как шахты, системы теплоснабжения которых имеют ряд характерных особенностей, рассматриваемых ниже.

Согласно [22], [68] любая система теплоснабжения состоит из следующих основных элементов (инженерных сооружений): источников теплоты, тепловых сетей, абонентских вводов и местных систем теплоснабжения.

В зависимости от организации движения теплоносителя системы теплоснабжения могут быть закрытые, полужакрытые и открытые; от типа теплоносителя – паровые и водяные. Анализ существующих систем теплоснабжения шахт показал, что на них используются преимущественно закрытые двухтрубные водяные (по данным [103] более 90%) системы теплоснабжения (общий вид приведен на рис.1.1) [102], в которых потребитель использует только часть теплоты, содержащейся в теплоносителе, а сам теплоноситель вместе с остаточным количеством теплоты, возвращается к источнику, где снова пополняется теплотой.

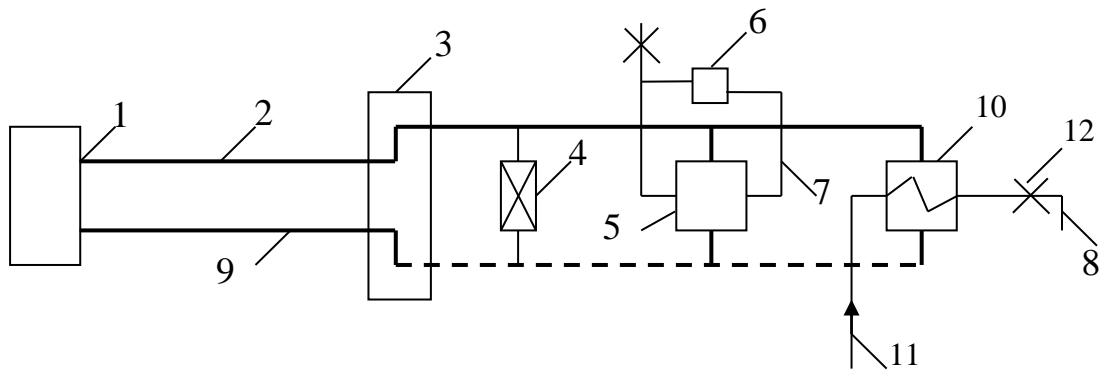


Рисунок 1.1 – Принципиальная схема закрытой двухтрубной водяной системы теплоснабжения:

1 – источник теплоты; 2 – подающий трубопровод сети; 3 - абонентский ввод; 4 – калорифер вентиляции; 5 – абонентский теплообменник отопления; 6 – нагревательный прибор; 7 – трубопровод местной системы отопления; 8 – местная система горячего водоснабжения; 9 – обратный трубопровод теплосети; 10 – теплообменник горячего водоснабжения; 11 – холодный трубопровод; 12 – вентиль

Двухтрубные водяные системы теплоснабжения бывают закрытые и открытые [68]. В закрытых системах теплоснабжения теплоноситель нигде не расходуется, а только циркулирует между источником теплоты и тепловыми абонентами. Это означает, что такие системы закрыты по отношению к атмосфере. Для таких схем теоретически верно выражение

$$g_{tn} = const. \quad (1.1)$$

То есть, количество уходящей от источника и подходящей к нему воды g_{tn} одинаково. В реальных же системах всегда количество обратки меньше нагретой подаваемой воды, что обусловлено наличием утечек в системах теплоснабжения, и компенсируется за счет постоянной внешней подпитки теплоносителя. Потери воды при хорошей эксплуатации теплосетей составляют до 0,5% объема.

Системы теплоснабжения также отличаются технологией подготовки воды для местных систем горячего водоснабжения. В открытых системах водоснабжения воду для горячего водоснабжения берут непосредственно из

тепловой сети. В закрытых системах для горячего водоснабжения используется водопроводная вода, которая подогревается в поверхностных теплообменниках водой от тепловой сети (Рис.1.2).

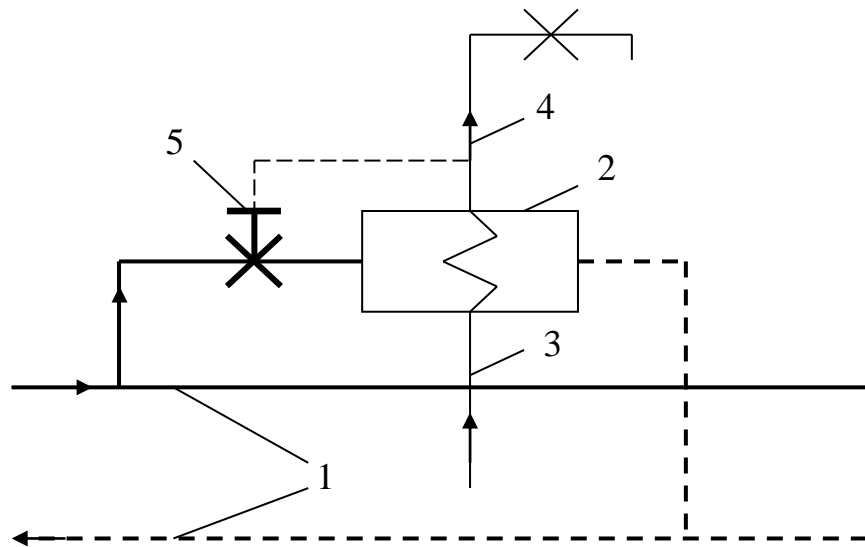


Рисунок 1.2 – Принципиальная схема приготовления воды для горячего водоснабжения по закрытой схеме:

1 – подающий и обратный трубопроводы тепловой сети; 2 – теплообменник горячего водоснабжения; 3 – холодный водопровод; 4 – местная система горячего водоснабжения; 5 – регулятор температуры

На шахтах используются закрытые системы водоснабжения [138], что обусловлено необходимостью обязательной предварительной водоподготовки перед ее подачей потребителю ввиду плохого качества воды в источниках водоснабжения на шахтах.

Среди специфических конструктивных и технологических особенностей шахтных систем теплоснабжения необходимо отметить:

- 1) тепломагистрали небольшой протяженности;
- 2) централизованное местное теплоснабжение от собственной котельной установки по одноступенчатой схеме;
- 3) использование нескольких теплогенерирующих, как правило, водогрейных установок;

- 4) периодические суточные колебания нагрузки на горячее водоснабжение и отопление с амплитудой в 5-6 МВт ввиду графика работы шахты в четыре смены, что сопоставимо с тепловой мощностью котельного агрегата (Рис.1.3);
- 5) наличие среди тепловых абонентов калориферной установки, потребителя, характеризуемого большой потребляемой тепловой мощностью до 12 МВт на вентиляцию и отсутствием теплоаккумулирующей способности;
- 6) необходимость оперативно удовлетворять тепловой спрос шахтной калориферной установки, поскольку в противном случае снижение температуры воздуха, подаваемого в шахту, ниже 2°C приводит к обмерзанию ствола и остановке работы предприятия.

В общем виде схема теплоснабжения шахты включает в себя [102] (Рис.1.3): тепловую сеть, m источников теплоты (в качестве последних примем котлоагрегаты с НТКС), работающих на один коллектор (каждый из которых производит $Q_{k.a.i}$ теплоты), n тепловых абонентов (каждый из которых потребляет $Q_{a,j}$ теплоты и характеризуется расходом теплоносителя g_j). Абоненты и источники теплоты подсоединены к тепловой сети параллельно.

Основными тепловыми абонентами шахты являются – административно-бытовой комбинат (АБК), калориферная установка (КУ), система горячего водоснабжения (ГВС), вспомогательные здания и сооружения (склады, мастерские, галереи, цеха, теплицы и т.п.); также от шахтной котельной может запитываться и система теплоснабжения жилых домов пришахтных поселков.

Для поддержания постоянного расхода теплоносителя в гидросистему включены несколько (k) циркуляционных насосов, каждый из которых обеспечивает расход воды $g_{n1}, g_{n2}, \dots, g_{nk}$, а также один подпиточный насос для компенсации потерь теплоносителя из-за утечек.

Теплота, вырабатываемая шахтной котельной, идет на компенсацию нужд шахтных абонентов по отоплению Q_{ot} , вентиляции Q_{vent} , горячему водоснабжению

Q_{gvs} , проветриванию горных выработок КУ Q_{kal} , а также потерь теплоты в трубопроводной сети $Q_{pot.tr.}$

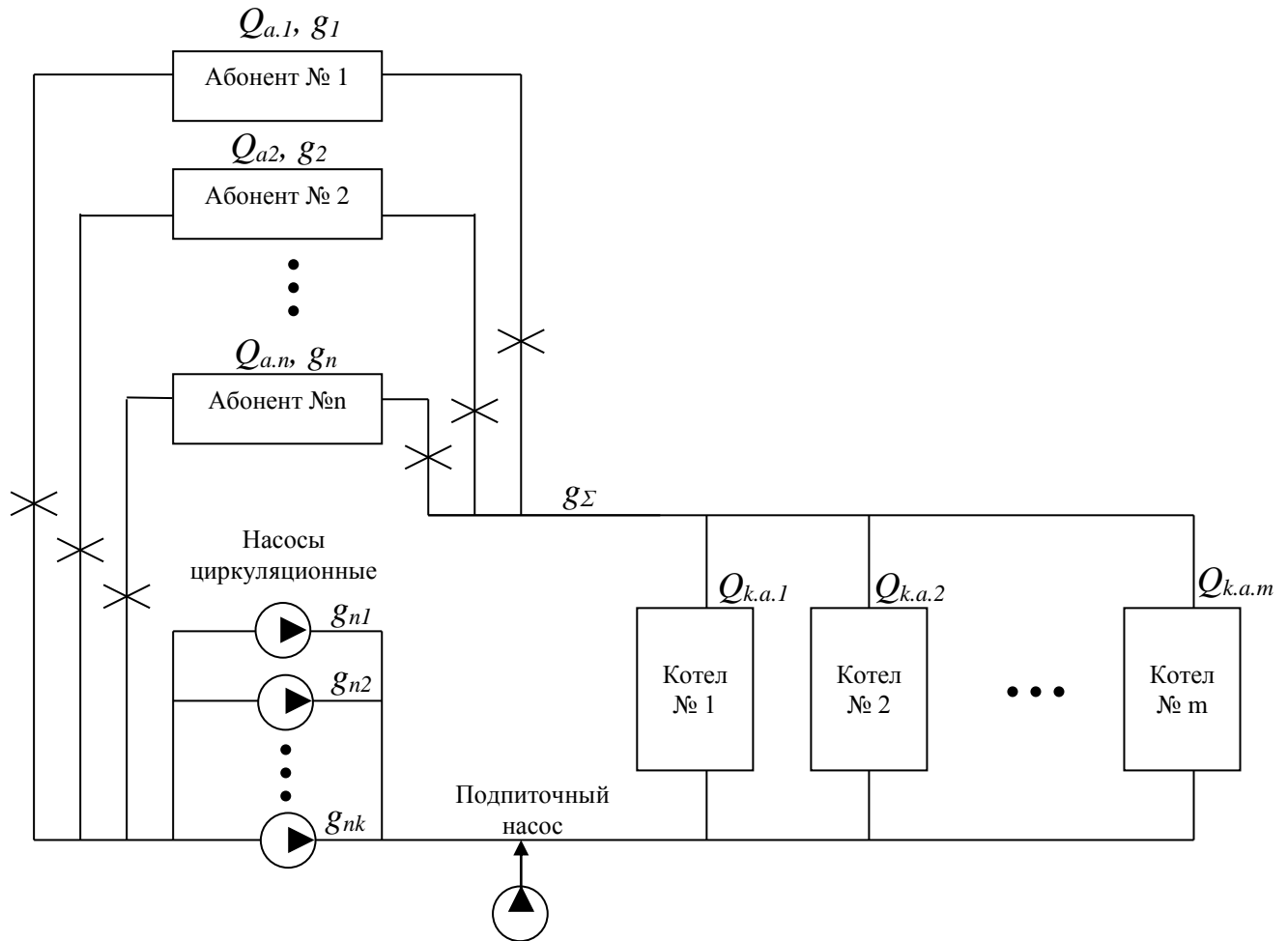


Рисунок 1.3 – Структурная схема системы теплоснабжения шахты:

m – количество котлоагрегатов с НТКС, n – количество тепловых абонентов; k – количество циркуляционных насосов, $Q_{k.a.1}, Q_{k.a.2}, \dots, Q_{k.a.m}$ – количество теплоты, производимой каждым котлоагрегатом, $Q_{a.1}, Q_{a.2}, \dots, Q_{a.n}$ – количество теплоты, потребляемое каждым абонентом, g_1, g_2, \dots, g_n – расходы теплоносителя по каждому абоненту, $g_{n1}, g_{n2}, \dots, g_{nk}$ – расход теплоносителя, обеспечиваемый каждым циркуляционным насосом, g_{Σ} – общий расход теплоносителя в системе

Таким образом, для обеспечения санитарно-гигиенических норм труда, а также требований ПБ угольных шахт по температуре воздуха, подаваемого в

шахту, в каждый момент времени в системе теплоснабжения предприятия должен соблюдаться следующий тепловой баланс

$$\sum_{j=1}^n Q_{a.j} + Q_{gvs} + Q_{kal} + \sum_{j=1}^n Q_{ptr.j} = \sum_{i=1}^m Q_{k.a.i} - \sum_{i=1}^m Q_{pot}, \quad (1.2)$$

где $\sum_{j=1}^n Q_{a.j} = \sum_{j=1}^n (Q_{ot.j} + Q_{vent.j})$ – сумма потребляемой абонентами теплоты;

Q_{gvs} – теплота, потребляемая шахтой на горячее водоснабжение, Вт;

Q_{kal} – теплота, потребляемая калориферной установкой, Вт;

$\sum_{j=1}^n Q_{pot.tr.j}$ – сумма потерь теплоты в сети теплоснабжения при его

транспортировании к абонентам, Вт;

$\sum_{i=1}^m Q_{ka.i}$ – сумма теплоты, производимой всеми котлами с НТКС, Вт;

$\sum_{i=1}^m Q_{pot.i}$ – сумма потерь теплоты в котлоагрегатах при его производстве, Вт.

При определении требуемой производительности котлоагрегатов системы теплоснабжения шахты учитывают максимальную потребность предприятия. Продолжительность отопительного периода при этом принимают 176 дней [47, 118, 67], а время работы калориферной установки 150 дней [71]. Пользуются нормативными расчетами по укрупненным показателям – удельным отопительным $\delta_{ot,i}$, и вентиляционным $\delta_{vent,i}$, характеристикам шахтных зданий и сооружений; расчетной температуре наружного воздуха t_{vn} , нормативному расходу воздуха через шахту g_{kal} , нормируемой температуре внутри шахтных зданий t_{pom}^n . При проектных и поверочных расчетах расход теплоты на горячее водоснабжение для горных предприятий принимают условно постоянным в течение года $Q_{gvs} \approx const$.

Для осуществления оперативного регулирования производительности шахтной котельной необходимо своевременно прогнозировать изменения

теплового спроса шахтных абонентов по градиенту изменения температуры окружающей среды и пользоваться при этом не только суточным прогнозом температуры, но и фактическими показаниями средств измерения температуры наружного воздуха, используемых для мониторинга системы теплоснабжения шахты. Целесообразно принять прогноз во временной перспективе до 2-х часов, что обеспечивает двойной запас по времени для розжига топki НТКС при необходимости увеличить суммарную производительность котлоагрегатов. Для прогноза теплового спроса необходимо в автоматическом режиме рассчитывать для каждого j -го абонента часовые расходы тепловой энергии на отопление, вентиляцию, горячее водоснабжение и калориферную установку, соответственно [109, 71, 112]

$$Q_{ot.j} = K \cdot \delta_{ot.j} \cdot V_{zd.j} (t_{pom.j}^n - t_{vn}), \quad (1.3)$$

где K – коэффициент влияния скорости ветра;

$V_{zd.j}$ – объем здания по внешнему обмеру, м³;

$$Q_{vent.j} = \delta_{vent.j} \cdot V_{zd.j} (t_{pom.j}^n - t_{vn}); \quad (14)$$

$$Q_{gvs} = f(\tau, N), \quad (1.5)$$

где τ – время суток, ч;

N – списочный состав трудящихся, чел.

$$Q_{kal} = 1,3 \cdot g_{kal} (4 - t_{vn}). \quad (1.6)$$

Таким образом, на основании выражений (1.3) - (1.6) можно определить требуемую часовую производительность шахтной котельной установки, как сумму прогнозируемых часовых расходов теплоты каждым j -м абонентом с учетом потерь, обозначенных в выражении (1.2). При этом потери теплоты в сети

учитываются с помощью коэффициентов, определяемых по результатам ремонтно-наладочных работ, а потери теплоты в котлоагрегатах учитываются по тепловому балансу при определении КПД котла $\eta_{ka.i}$. Тогда задание по суммарной производительности группы котлоагрегатов с топками НТКС шахтной котельной установки с учетом КПД каждого котла равно:

$$\sum_{i=1}^m (Q_{k.a.i} \cdot \eta_{k.a.i}) = \sum_{j=1}^n (Q_{ot,j} + Q_{vent,j}) + Q_{kal} + Q_{gvs} + \sum_{j=1}^n Q_{pot.tr,j}; \quad (1.7)$$

Рисунок 1.4 иллюстрирует изменение теплового спроса шахты в течение суток на примере шахты «Южнодонбасская № 1» (г. Угледар) [102]. График суточного теплопотребления рассчитан для примера декабря 2015 г, когда перепад суточной температуры составил 10⁰С от -2⁰С до +8⁰С [96, 97]. При составлении графика теплопотребления на горячее водоснабжение исходили из того, что четыре пика водопотребления равномерно распределены в сутках, что связано с четырехсменным режимом работы шахты. Нормативное значение температуры горячей воды составляет 60⁰С. При этом принято, что за сутки расход горячей воды условно-постоянен, а суточными колебаниями изменения расхода теплоты, потребляемого на горячее водоснабжение вследствие колебания температуры окружающей среды, можно пренебречь [118].

Технологическим предназначением шахтной КУ является поддержание температуры воздуха, подаваемого в ствол шахты, не ниже 2⁰С [100], в противном случае наступает аварийная ситуация - обмерзание ствола, что полностью блокирует работу всего предприятия. На большинстве шахт применяются водогрейные КУ [71]. С учетом возможной погрешности средства измерения температуры воздуха, подаваемого в шахту, в пределах $\pm 2^0\text{C}$, за нижний предел допустимой температуры принимается 4⁰С. Таким образом, КУ относится к объектам теплоснабжения, в которых вся теплота тратится на вентиляцию, теплоаккумулирующая способность отсутствует, а при температуре выше 4⁰С, теплопотребление отсутствует.

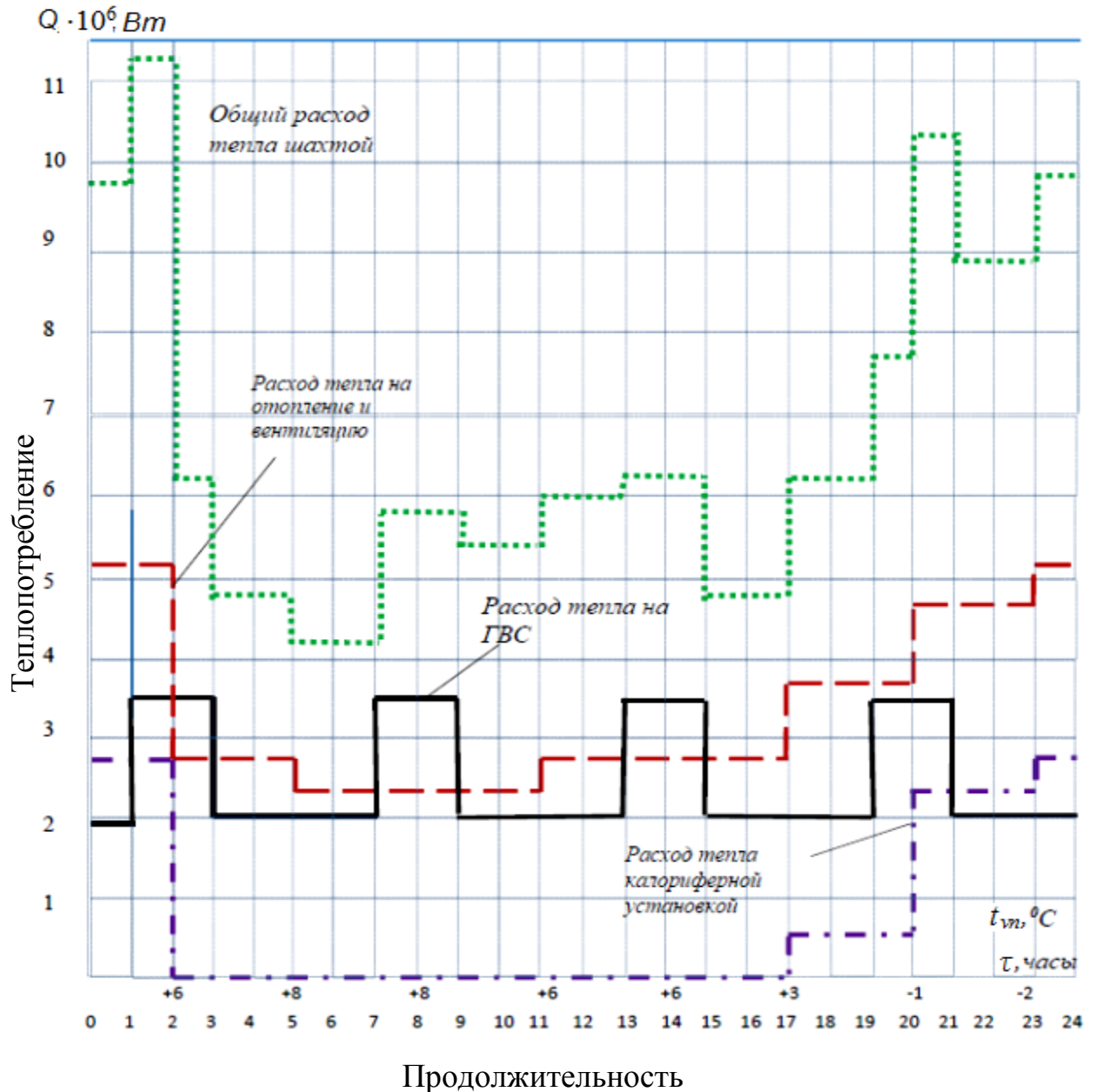


Рисунок 1.4 – Суточный график потребления теплоты шахтой на примере шахты «Южнодонбасская № 1» (г. Угледар) (декабрь 2015 г.)

Однако, КУ относится к одним из самых мощных тепловых абонентов шахты, при падении температуры окружающей среды до нормативного минимума -22°C , мощность ее теплопотребления может достигать 12 МВт [71]. В результате этого годовой график теплопотребления шахты по продолжительности, на примере теплопотребления промплощадки шахты «Южнодонбасская №1» ПО «Донецкуголь» [102], имеет вид, представленный на рис. 1.5.

1.2 Топки низкотемпературного кипящего слоя как источники теплоты в системе теплоснабжения шахты

Наиболее распространенные на данный момент в качестве источников теплоты на шахтах слоевые топки имеют существенные недостатки, в том числе низкий КПД, невозможность полной автоматизации их работы и оперативного регулирования производительности, длительный розжиг, требование к зольности топлива не выше 40%. Поэтому, с учетом тенденции последних десятилетий к удорожанию добычи и снижению качества каменноугольного топлива (содержание золы в добытых углях достигает 35% [55]), целесообразно в качестве источников теплоты на шахтах применять котлы с топками НТКС.

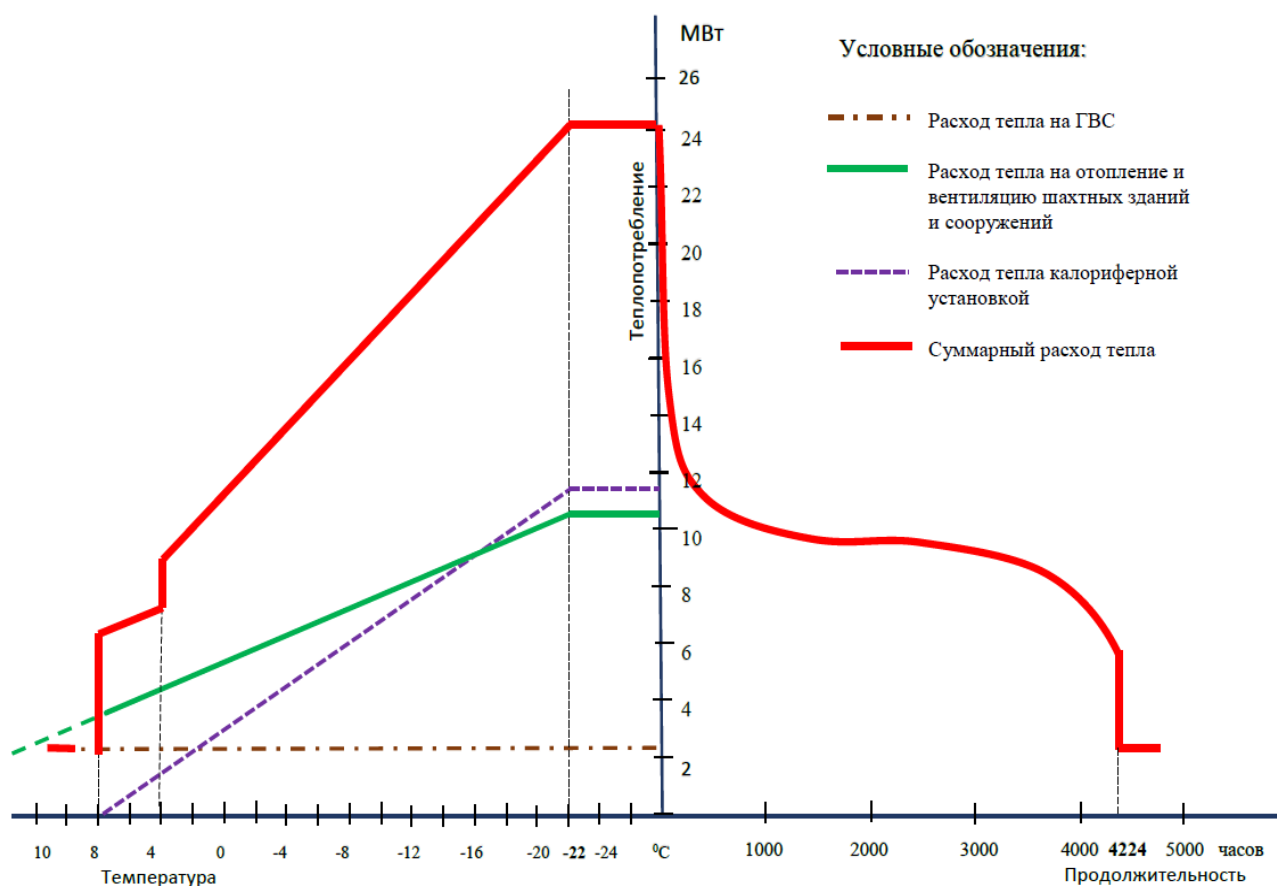


Рисунок 1.5 – Годовой график потребления теплоты шахтой по продолжительности на примере шахты «Южнодонбасская № 1» (г. Угледар) за 2015 г.

Данная технология, по сравнению со слоевым сжиганием, имеет следующие преимущества: способность сжигать угли с зольностью до 70%, используя некондиционный уголь шахты, КПД котлоагрегатов может достигать 83% [31], имеется возможность вывода топki НТКС в «горячий резерв», из которого кипящий слой возвращается в рабочее состояние максимум за 30 мин, возможность полной автоматизации работы топki, наличие нескольких способов оперативного регулирования ее производительности, снижение выбросов в атмосферу оксидов азота.

В таблице 1.1 приведена характеристика котлов с топками НТКС, применяемых на данный момент в системах теплоснабжения шахт на территории Донецкого региона.

Таблица 1.1 – Статистические данные по применению котлоагрегатов с НТКС на территории Донецкой Народной Республики

Типы котлов	Кол-во	Тепло-носитель вода	Тепло-носитель пар	Количество котлов на территории ДНР
ДКВ 6,5/13*	5	5		3
ДКВР 6,5/13*	8	6	2	3
ДКВР 4/13*	8	8		2
КВКС-4	6	6		4
КВФ-4	12	12		4
КЕ 6,5/14*	7	6	1	
КЕ 10/14*	15	14	1	4
ДВР 10/13	15	15		2
ВК-4	6	6		

* паровые котлоагрегаты были переведены в водогрейный режим

Как следует из таблицы 1.1, большинство применяемых на данный момент котлов с топками НТКС – водогрейные, и их число на территории ДНР неоправданно мало.

Рассмотрим технологию сжигания твердого топлива в НТКС. На рисунке 1.6 представлено схематичное изображение топki НТКС. Псевдоожиженный (кипящий) слой представляет собой совокупность полидисперсных частиц, через которые продувается оживающий воздух с определённой скоростью, достаточной для оживаения и не превышающей скорость уноса частиц топлива из топki. При этом частицы топлива находятся во взвешенном состоянии и интенсивно перемешиваются по объёму топki, благодаря чему улучшается поступление воздуха ко всем частицам топлива и интенсифицируется процесс горения [31].

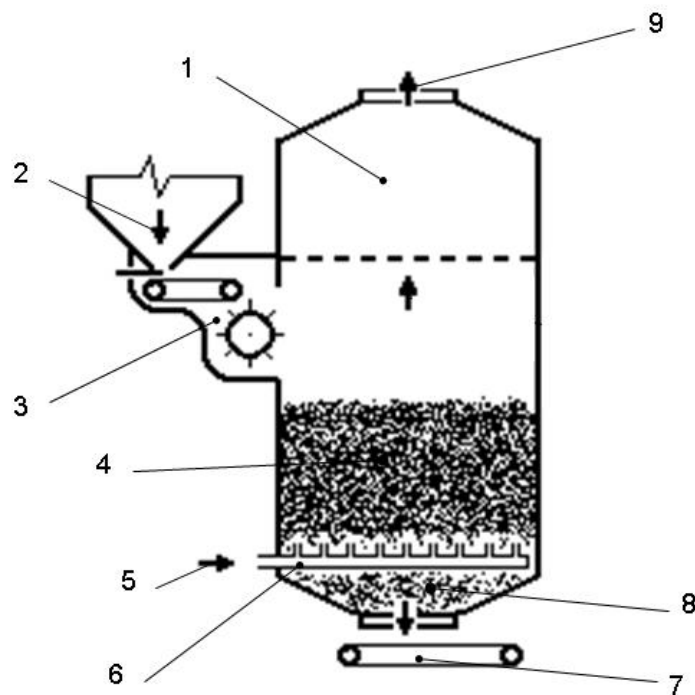


Рисунок 1.6 – Технологическая схема топki НТКС:

1 – камера смешения; 2 – топливо; 3 – система топливоподачи; 4 – кипящий слой; 5 – дутьевой воздух; 6 – воздухораспределительная решетка; 7 – конвейер золоудаления; 8 – зольный бункер; 9 – дымовые газы

Дутьевой воздух для ожижения слоя подаётся в топку через воздухораспределительную решётку при помощи высоконапорного дутьевого вентилятора ВМЦ-6 со скоростью достаточной для кипения слоя. Для равномерного распределения воздуха по всей площади топки устанавливаются воздухоподающие колпачки с 6-8 отверстиями для прохода воздуха, скорость которого на выходе из отверстий составляет 60-80 м/с. Конструкция колпачка должна исключать попадания шлака или топлива в воздухоподающие каналы при прекращении подачи воздуха. В топки с НТКС воздух должен, в зависимости от высоты слоя, поступать под давлением 3-10 кПа.

Для достижения необходимого давления применяются высоконапорные вентиляторы типа ВМЦ-6. Скорость воздуха проходящего через зеркало горения, составляет 2,5-4 м/с, что необходимо для кипения слоя. Коэффициент избытка воздуха, подаваемого в топку на 1 кг угля несколько выше, чем для слоевых топок, и составляет 1,2-1,6 теоретически необходимого.

Воздухораспределительная решётка представляет собой совокупность труб, приваренных к воздухораспределительному коллектору, к которым приварены патрубки с колпачками, имеющими по периметру отверстия, через которые под высоким давлением подаётся воздух в топку.

Воздухораспределительная решётка выполняет несколько функций:

- обеспечивает равномерное распределение ожижающего агента по всему сечению топки;
- отделяет кипящий слой от остального пространства;
- способствует распределению частиц в кипящем слое по всему сечению топки;
- обеспечивает равномерное распределение топлива и удаление золы из слоя.

Топливо в топку подаётся из топливного бункера с фронта котла при помощи забрасывателя типа ЗП-600, который крепится к фронтальной плите от топки ЗП-РПК. Причём фракционный состав топлива не должен превышать 13 мм, что следует из условий псевдоожижения слоя. Требуемый фракционный состав топлива обеспечивается посредством применения дробилки или узла

отсева на стадии топливоподготовки и в угольный бункер поступает топливо с фракцией до 13 мм. В связи с тем, что размер кусков топлива, подаваемых в топку, не превышает 13 мм, а скорости воздуха в слое повышенные, большое количество мелких частиц несгоревшего топлива уносятся с дымовыми газами в газоочистку, где они улавливаются и возвращаются в топку на дожигание [78].

Для бесперебойной и безаварийной работы топок НТКС большое значение имеет поддержание температуры и высоты слоя, что в процессе сжигания угля обеспечивается своевременностью удаления накапливающейся золы.

Наиболее надёжными и безаварийными в работе оказались разгрузчики качающегося типа, состоящие из стола с отверстием для просыпания золы, кривошипно-шатунного механизма, редуктора и электродвигателя. Стол качающегося разгрузчика установлен под бункерами золонакопления. От двигателя через редуктор и кривошипно-шатунный механизм стол получает возвратно-поступательное движение. Через окна бункера на стол насыпается зола, которая при очередном движении просыпается в отверстие на конвейер золоудаления.

Практическая реализация низкотемпературного способа сжигания связана с преодолением ряда технических трудностей, наиболее значительными из которых являются:

- 1) Необходимость предотвращения шлакования слоя. Устойчивость процесса ожижения в значительной степени определяется крупностью подаваемого в топку топлива: при увеличении фракции топлива выше определённого размера процесс ожижения прекращается и топка шлакуется: мелкие фракции вообще не участвуют в процессе ожижения, так как выносятся из топки, что приводит к значительному механическому недожогу. Следовательно, к подготовке топлива предъявляются повышенные требования. Большое влияние на шлакование топки оказывают также конструкция и размеры газораспределительных устройств, которые формируют гидродинамику псевдоожиженного слоя и обеспечивают отсутствие застойных (неожиженных) зон.

2) Неизученность процесса разогрева слоя до температуры воспламенения твёрдого топлива, для которого требуются громоздкие дополнительные устройства, а также дополнительно газообразное или жидкое топливо.

3) Необходимость обеспечения надёжной работы поверхностей нагрева в среде с высокой концентрацией абразивных твёрдых частиц.

4) Отсутствие ряда оборудования и средств автоматизации.

Ввиду высокой интенсивности процессов окисления топлива в кипящем слое, если не обеспечить отвод теплоты из слоя, частицы угля и наполнителя нагреваются выше температуры начала размягчения золы и слой зашлаковывается. Чтобы этого не происходило, необходимо вести процесс горения так, чтобы температура в слое не превышала температуру начала размягчения золы.

Наиболее целесообразно обеспечить температуру слоя равной $800 - 850^{\circ}\text{C}$. Температуры близкие к 800°C определяются наиболее оптимальными условиями связывания оксидов серы, выделяющимися из топлива в процессе горения, доломитом и известняком, а также щелочноземельными металлами, содержащимися в золе топлива. При этих температурах снижаются и выбросы оксида азота.

Поддержание температуры на заданном уровне может быть осуществлено различными способами:

– установкой дополнительных погружных поверхностей нагрева (ППН), набранных из труб; внутри труб циркулирует вода, которая нагревается, отбирая теплоту слоя; охлаждение слоя погруженными в него трубчатыми поверхностями не позволяет подняться температуре выше температуры начала размягчения золы; спекание золы в этом случае не происходит и слой остаётся в подвижном состоянии;

- подачей избыточного количества воздуха, что менее экономично;
- подачей на слой воды (пара или других инертных газов);
- пневмотранспорт в слой “холодных” негорючих твёрдых частиц.

Погружные поверхности, отбирая до 50% теплоты, выделяющейся в топке,

позволяют увеличить теплопроизводительность котлоагрегата на 60% относительно производительности при отсутствии ППН, а также уменьшить поверхность нагрева, что в свою очередь сокращает габариты и металлоёмкость при проектировании агрегата. Это объясняется высоким коэффициентом теплопередачи от кипящего слоя к поверхности погруженных в него труб.

На рис.1.7 представлены поверхности нагрева котлоагрегата с НТКС на примере КВ-КС-4.

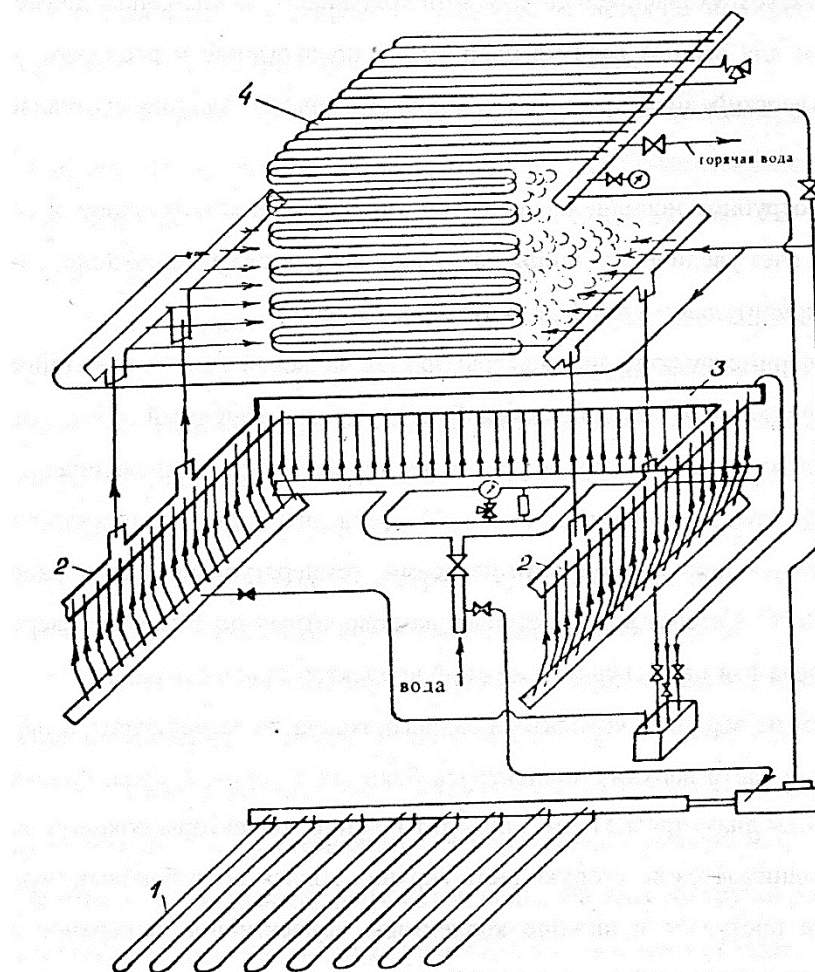


Рисунок 1.7 – Поверхности нагрева котельного агрегата с топкой НТКС на примере котла КВ-КС-4:

1 – погружные поверхности нагрева (ППН); 2 – боковые экраны; 3 – задний экран; (2 и 3 – фронтальные экранные поверхности нагрева ЭПН); 4 – конвективные поверхности нагрева (КПН)

Топочная камера сзади и с боков экранирована трубами диаметром 51х22,5 мм с шагом 100 мм, входящими в коллектор диаметром 159х4,5 мм. Поверхности нагрева выполнены в виде экранных панелей, располагаемых по стенам топочной камеры. Конвективно-радиационная поверхность представляет собой горизонтальные пакеты змеевиков из труб диаметром 38х3 мм, расположенные в конвективном газоходе сверху над топкой.

Котел оборудован провальной однотрубной колпачковой воздухораспределительной решеткой. Решетка состоит из установленного на бункерах воздухораспределительного коллектора, изготовленного из трубы диаметром 426х9 мм, к которой приварены 128 патрубков диаметром 38х3,5 мм с воздухораспределительными колпачками. В колпачках диаметром 48 мм для выхода воздуха равномерно по окружности расположены 8 отверстий диаметром 7 мм. Площадь зеркала горения составляет 2 м².

Однотрубное исполнение решетки упрощает ее конструкцию и позволяет за счет увеличения длины патрубков использовать теплоту золы слива для дополнительного подогрева дутьевого воздуха.

Удаление шлака из топок с НТКС не вызывает затруднений, так как кусочки шлака, вследствие их большой плотности, тонут в кипящем слое и собираются в нижней части топки. Шлакоудаляющие устройства должны обеспечить необходимую герметичность.

По периметру топочной камеры под колпачковой решеткой установлен двухсекционный металлический бункер, предназначенный для накопления и слива золы. Бункер закреплен на каркасе котла. Движение воды (в соответствии с рис.1.7) осуществляется принудительно циркуляционными насосами, температурный график работы: 95...70⁰С. Сетевая вода поступает на поворотную погружную поверхность нагрева и параллельно в нижний коллектор заднего экрана.

Затем из верхнего коллектора заднего экрана вода поступает в первые верхние части верхних коллекторов боковых экранов, откуда, опускаясь по трубам диаметром 51 мм, проходит нижние коллекторы боковых экранов и

поднимается во вторую часть верхних коллекторов боковых экранов. Далее поступает в нижние коллекторы конвективной поверхности. Сюда же поступает вода из погружной поверхности нагрева. Пройдя пакет змеевиков, вода направляется потребителю. Во избежание закипания, средняя скорость воды в отдельных элементах котла, обогреваемых излучением, не должна быть ниже 1 м/с. Обратная сетевая вода с температурой 70⁰С поступает от систем на всас сетевых насосов, подающих ее в котлы, где она нагревается до 95⁰С и сетевыми насосами подается в наружную сеть. Подпитка системы осуществляется очищенной химическим способом деаэрированной водой от подпиточных насосов во всасывающую линию сетевых насосов.

Сырая вода из водопровода насосами подается на подогреватель, где нагревается до 25⁰С и поступает на установку химводоочистки (ХВО). Умягченная вода в подогревателе нагревается до температуры 65⁰С и направляется на вакуумный деаэратор, с которого самотеком сливается в герметический бак подпиточной воды, вместимостью 3 м². Вакуум в деаэраторе создается водокольцевыми насосами.

Для поддержания температуры обратной воды на уровне 70⁰С с целью предотвращения конденсации водяных паров на поверхностях нагрева, ведущей к коррозии последних, перед котлами предусмотрена рециркуляционная линия с регулятором температуры, для подачи части воды из прямого в обратный трубопровод. На трубопровод, подающем умягченную воду к деаэратору, устанавливается регулирующий клапан, работающий от уровня воды в подпиточном баке. Автоматическая дозировка подпиточной воды осуществляется регуляторами давления прямого действия «после себя» и «до себя».

На трубопроводах прямой сетевой воды от котлов к магистральному трубопроводу предусматриваются измерительные диафрагмы, позволяющие измерять и контролировать расход воды. На этих же трубопроводах устанавливают обратные и предохранительные клапаны. Сброс воды при срабатывании предохранительных клапанов предусмотрен в охлаждающий колодец. Обмуровка котла выполнена толщиной 380 мм огнеупорным шамотным

кирпичом. Обмуровку обрамляет каркас, к которому крепятся экраны.

На рис. 1.8 представлена технологическая схема шахтной котельной установки с группой котлоагрегатов с НТКС [31, 101, 119].

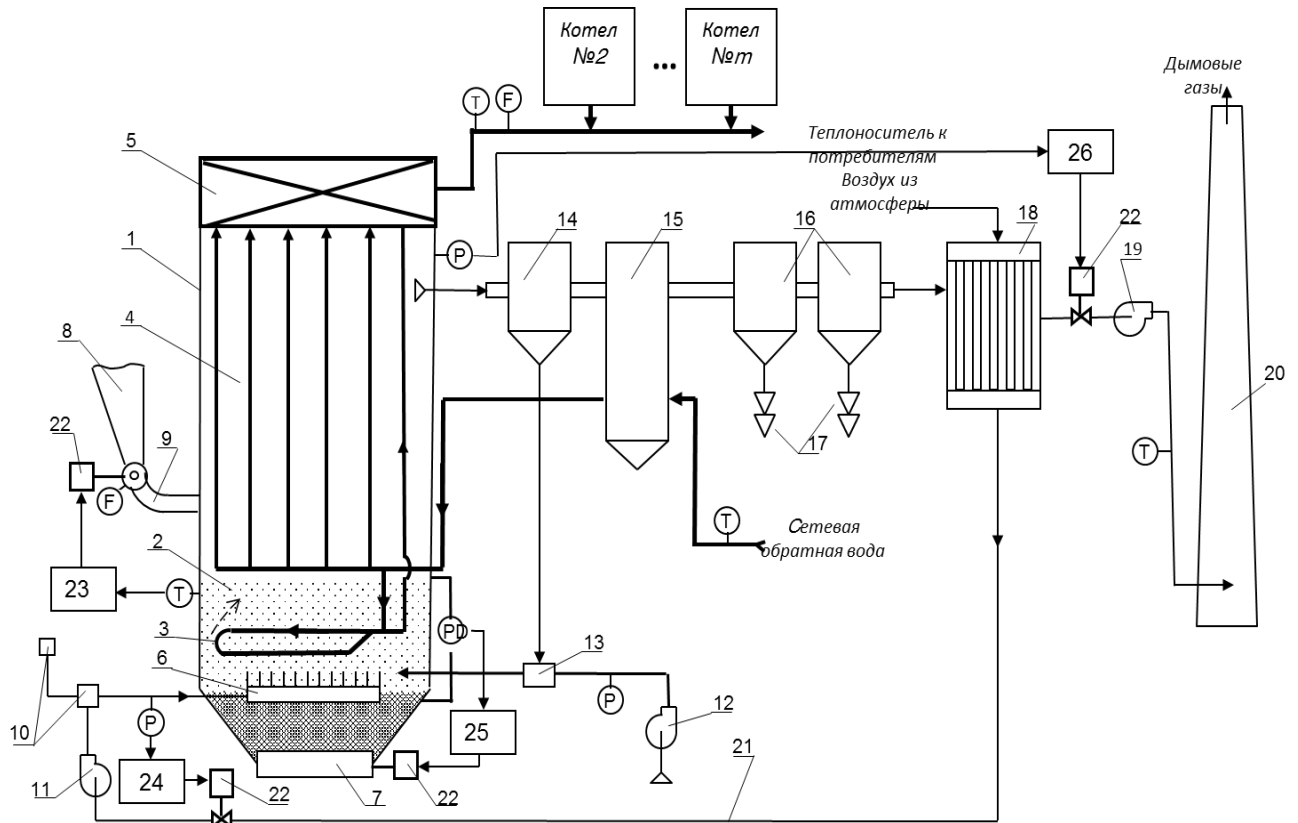


Рисунок 1.8 – Технологическая схема шахтной котельной установки с котлоагрегатами с НТКС:

1 – котел, 2 – топочное пространство, 3 – ППН, 4 – экранные поверхности нагрева (ЭПН), 5 – конвективные поверхности нагрева (КПН), 6 – воздухораспределительная решетка, 7 – золоудаляющее устройство, 8 – бункер твердого топлива, 9 – забрасыватель, 10 – растопочное устройство на жидком топливе, 11 – дутьевой вентилятор, 12 – вентилятор возврата уноса, 13 – эжектор, 14 – циклон прямоточный, 15 – экономайзер, 16 – циклоны первой и второй степени газоочистки, 17 – двойные пылевые затворы, 18 – воздухоподогреватель, 19 – дымосос, 20 – дымовая труба, 21 – воздуховод, 22 – исполнительные механизмы, 23 – 26 – регуляторы температуры слоя, расхода дутьевого воздуха, высоты слоя и разрежения над слоем, соответственно

Специфической особенностью котлов с НТКС является наличие ППН, которые могут быть как полностью, так и частично погружены в слой, что учитывается коэффициентом k_{ks} , который показывает, какой процент площади ППН (0-100%) погружен в данный момент в слой.

Поскольку с ростом нагрузки по воде $G_{k.a.}$, [119, 120] на котлоагрегат с НТКС возрастают и потери теплоты [112], то зависимость КПД котлоагрегатов $\eta_{k.a.} = f(G_{k.a.})$ от доли его номинальной мощности имеет нелинейный и уникальный для каждого котлоагрегата вид (Рис.1.9), поскольку данная зависимость меняется по мере эксплуатации и износа котлоагрегата, что приводит к ее различному виду даже для однотипных агрегатов.

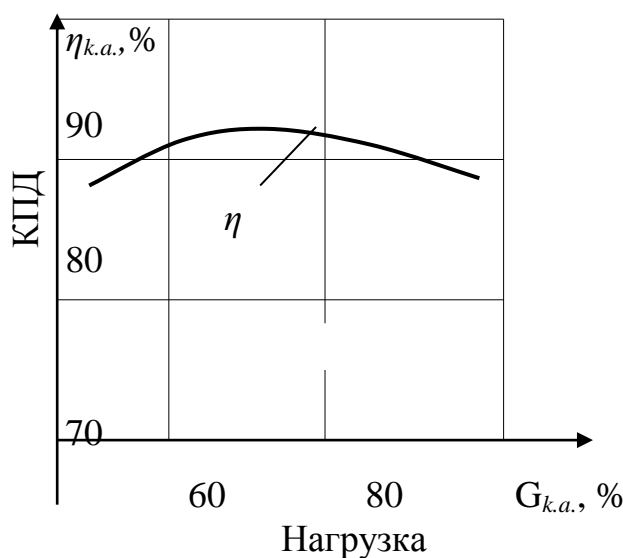


Рисунок 1.9 – Обобщенный вид зависимости КПД от нагрузки для котлоагрегата с НТКС

Сжигание топлива в низкотемпературном кипящем слое обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционным слоевым сжиганием топлива. Наиболее существенные преимущества:

- в низкотемпературном кипящем слое можно сжигать низкорреакционные и высокозольные угли с зольностью до 75-80%, что недостижимо при других способах сжигания. Это обусловлено стабилизацией процесса горения

топлива из-за наличия в слое большого количества нагретых до 800-950⁰С твёрдых частиц с высокой удельной теплоёмкостью;

- обеспечивается высокая теплоотдача к погруженным в слой поверхностям нагрева;
- повышается тепловая мощность котлоагрегатов, находящихся в эксплуатации, и снижается металлоёмкость вновь создаваемых благодаря интенсификации процессов теплообмена в кипящем слое;
- обеспечивается сжигание топлива с широким диапазоном зольности (от 15 до 80%) в одном топочном устройстве;
- увеличивается надёжность работы топочных устройств котлоагрегатов ввиду отсутствия движущихся колосниковых решеток;
- упрощается конструкция топочных устройств и возможность их механизации и автоматизации;
- повышается КПД котлов при сжигании низкосортных и высокозольных углей;
- улучшаются условия труда обслуживающего персонала за счет возможности автоматизации процесса сжигания, поддержание температуры горения топлива ниже начала размягчения золы, обеспечивающей безконгломератное его сжигание;
- достигается сокращение обслуживающего персонала на жаротрубных котлах устаревшей конструкции;
- обеспечивается годовой экономический эффект в сумме от 20 до 200 тыс.долларов США на один котлоагрегат в зависимости от режима его работы и использованного топлива [31].

1.3 Обзор научных работ в области повышения эффективности систем теплоснабжения и работы котлоагрегатов с НТКС

Анализ современных исследований в области повышения эффективности систем теплоснабжения показал, что современными авторами преимущественно

исследуются вопросы улучшения структуры сетей централизованного теплоснабжения, совершенствования конструктивных особенностей тепловых пунктов жилых домов, управления распределением теплоносителя между абонентами (в основном жилыми домами или квартирами). Данным исследованиям посвящены работы ученых РФ, Украины и ряда зарубежных авторов [1, 10, 23, 62, 63, 75, 92, 115]. Вместе с тем, тема энергоэффективности систем теплоснабжения таких промышленных предприятий, как шахта, практически совсем не раскрыта в современной литературе.

Публикации, посвященные эксплуатации топок НТКС не рассматривают перспективы их использования в качестве источников теплоты в шахтных котельных установках, а касаются теоретических вопросов усовершенствования самой технологии НТКС, детализации ее математического описания. Разработка критериев и методики поиска рациональной производительности котлоагрегатов с НТКС, работающих в группе на тепловую сеть шахты, имеет большой научный и практический интерес и представляет предмет исследований авторов. Частично результаты научных изысканий авторов по разработке методики уже изложены в работах [124, 128] и др.

Большая часть публикаций, посвященных управлению режимами систем теплоснабжения [5, 6, 49, 61, 65, 80 – 82, 114, 117], за небольшим исключением [92], исследует особенности управления энергетическими потоками в жилищно-коммунальной сфере и не учитывает специфику производства и распределения теплоты в условиях горных предприятий, оборудованных котельными установками с топками НТКС.

Наиболее глубоко динамические свойства отдельных элементов систем отопления и кондиционирования воздуха как объектов массо- и тепло переноса изложены в работах А.А. Рымкевича и А.Г. Сотникова. Однако, в данных исследованиях не рассматривается взаимосвязанный обмен тепловой энергией источников теплоты с абонентами в составе систем теплоснабжения. Также динамика распределения тепловой энергии между потребителями жилого дома исследовалась в работах Кутнего Б.А., Софиева А.В. и др. [80, 117].

Математическое описание динамики процесса производства теплоты в топках кипящего слоя достаточно широко представлена в работах ученых «Института угольных энерготехнологий НАН Украины», в частности К.М. Майстренко [86, 87], Н.В. Чернявского, белорусских ученых В.А.Бородули, Ю.П. Гупало, а также в работах авторов V.N. Shlyannikov, К.Е. Махорина, П.А. Хинкиса и др. [13, 88]. Однако, эти модели характеризуются целым рядом упрощений и предположений, в том числе не учитывают одновременное воздействие нескольких возмущающих факторов. Эти недостатки учтены в [38, 41], описываемый подход позволяет прогнозировать производительность топок НТКС при изменении одновременно нескольких технологических параметров. Так, можно сделать вывод, что на данный момент не существует комплексной математической модели системы теплоснабжения шахты, которая учитывала бы специфику таких источников теплоты, как группа топок НТКС, а также специфику изменения теплового спроса шахтных потребителей.

Известные исследования указанной проблематики касаются, в основном, вопросов рационального распределения тепловой энергии и технической реализации автоматизации комплексов теплоснабжения. Однако, почти все данные исследования касаются проблем теплообеспечения жилого комплекса и не учитывают специфических вопросов теплоснабжения промышленных предприятий, в частности, горных [5, 6, 16, 21].

Так, проблематика управления распределением теплоносителя между потребителями широко освещена и глубоко исследована в разработках Винницкого национального технического университета (Ю.М.Паночишин) [93 - 95], Харьковского политехнического института (Г.К. Вороновский) [32, 33] и государственного технического университета строительства и архитектуры (А.П. Федоров, Б.А. Кутный) [80 - 82, 133, 134].

Так в [57, 58, 93, 94] проведено моделирование системы управления потокораспределением в сети теплоснабжения, который обобщает математические модели сбора и передачи информации, а также выработки и реализации управляющего воздействия. Также предложен новый метод

математического моделирования в задачах оценки состояния потокораспределения в сети теплоснабжения, который позволяет учесть неодновременности измерений параметров и экспертные оценки параметров, не подлежащих измерению, разработана математическая модель оптимизации потокораспределения, методика проектирования и оптимизации систем управления потокораспределением в сети теплоснабжения.

В работах [32, 33] разработана новая концепция построения автоматизированных систем управления отпуском теплоты от крупных источников теплоснабжения в городах. С этой целью были предложены новые методы синтеза регуляторов отпуска теплоты, которые используют информацию о внешней температуре и об уровне избыточного энергопотребления, методы компенсации транспортного запаздывания теплоносителя в режимах управляемого теплоснабжения, а также методы синтеза адаптивных регуляторов теплоты в условиях неопределенности.

Практической реализацией научных положений, изложенных в [33] является разработка системы управления качеством теплоснабжения и интеллектуальной поддержки принятия решений по отпуску теплоты в системе централизованного теплоснабжения.

В работах [133, 134, 137] определены рациональные режимы отпуска теплоты при различных схемах теплоснабжения и решена проблема снижения себестоимости производства теплоносителя за счет оптимального распределения расходов теплоносителя в тепловой сети.

В [81] исследования ведутся в направлении повышения эффективности использования теплоты в системах отопления жилых и административных зданий централизованных систем теплоснабжения в период "срезки" отопительного графика путем усовершенствования методов и схем регулирования расхода теплоты в индивидуальных тепловых пунктах. Для этого был предложен метод двупозиционного регулирования отпуска теплоты на отопление индивидуального теплового пункта, основанный на прогнозировании температуры внутреннего воздуха отапливаемого дома с помощью математической модели.

Также достаточно много зарубежных публикаций по вопросам регулирования отпуска теплоты: Батинич Г. («Progress», Белград), Адрианова Д.Е. (Муромский институт Владимирского государственного университета) [21], Чупина Л.В. (Конструкторское бюро комплексных систем, РФ) и др.

Однако, главной проблемой при анализе исследований по данной тематике остается то, что практически все работы касаются проблем управления распределением теплоты между теплопотребителями без учета особенностей работы котельных установок. Также достаточно широко освещены в литературе вопросы управления распределением теплоты между потребителями, в отличие от вопроса управления производством тепловой энергии котлоагрегатами с НТКС.

Сложность вопроса заключается в том, что большинство работ, посвященных функционированию топок НТКС, касается совершенствованию технологии сжигания угля в НТКС, изложенной в результатах исследований Института угольных технологий НАН Украины (О.Ю. Майстренко, Ю.П. Корчевой и др.) [76, 86, 87], и зарубежных авторов [14, 62], а многофакторное управление работой данных объектов с помощью систем автоматизированного управления почти не исследовано.

Анализ современных методов моделирования теплотехнических комплексов показывает, что большинство рассмотренных работ по данной тематике исследуют только процессы распределения тепловой энергии, и не учитывают особенности процесса ее производства и предполагают значительные упрощения при определении потерь тепловой энергии [3, 4, 21]. На данный момент разработаны основные принципы моделирования теплогидравлических сетей [117] и методы расчета температурных графиков отпуска теплоты на основе теплогидравлического моделирования [98, 99, 134]. Однако данные модели не учитывают динамические свойства элементов сетей.

Наиболее глубоко динамические свойства отдельных элементов систем отопления и кондиционирования воздуха как объектов массо- и теплопереноса изложены в работах А.А. Рымкевича, А.Г. Сотникова. В данных исследованиях [110, 116] элементы систем отопления и кондиционирования воздуха были

рассмотрены как объекты с сосредоточенными параметрами, так и в качестве объектов с распределенными параметрами. На основе этого были получены передаточные функции элементов теплоснабжения, и определены их динамические характеристики при различных видах управления. Однако в данных исследованиях не учитывается взаимообмен элементов комплекса тепловой энергией в составе системы теплоснабжения.

Динамика распределения тепловой энергии между потребителями жилого дома изложена в работе [80]. Данное исследование касается разработки математической модели нестационарных тепловых режимов отапливаемого здания, и метода двухпозиционного регулирования отпуска теплоты на отопление, основанный на прогнозировании температуры внутреннего воздуха отапливаемого дома с помощью математической модели.

Динамика процесса производства теплоты топками КС достаточно широко представлена в работах ученых Института угольных энерготехнологий НАН Украины, в частности К.М. Майстренко, Рохман Б.Б. а также зарубежных авторов Бородуля В.А., Гупало Ю.П., Махорина К.Е., Хинкиса П.А. и др. [2, 11, 14, 17, 28, 29, 50]. Однако, эти модели характеризуются целым рядом упрощений и предположений, в том числе не учитывают одновременное воздействие нескольких возмущающих факторов.

Эти недостатки исправлены в работах [36, 38, 44, 90], в частности учитывается изменение значений теплоемкости воздуха и материалов слоя при изменении температуры в пределах существования слоя, изменение гранулометрического и химического состава топлива и др., что позволяет определять изменение удельной теплоемкости КШ во времени в зависимости от количества теплоты, получаемого слоем. Также в работах [36, 44] определены принципы управления производительностью топок НТКС при различных управляющих воздействиях, разработана математическая модель топки НТКС и разработана система управления ее работой.

Следовательно, уровень раскрытия вопросов по регулированию производства и отпуска теплоты и определения параметров системы управления

теплоэнергетическими процессами не позволяет установить определенные критерии и принять соответствующие технические решения по их автоматизации. Специфика одновременного взаимосвязанного регулирования режимов работы всех составляющих комплекса теплоснабжения шахты не рассмотрена совсем.

Таким образом, актуальным является научное обоснование параметров автоматизированного управления производством тепловой энергии котлоагрегатами с топками НТКС, определения рациональной производительности каждой топки НТКС при их совместной работе на тепловую сеть, и прогнозирования потребительского спроса в соответствии с внешними условиями.

Также рационально предложить эксплуатацию системы управления производительностью одной топки НТКС, рассмотренную в [44] в составе разрабатываемой многоуровневой системы управления комплексом теплоснабжения шахты на уровне управления производительностью топок в соответствии с определенным заданием.

1.4 Обоснование принятого направления разработок. Методы исследования

Анализ состояния вопроса показал, что на данный момент неизученным остается вопрос обеспечения эффективной работы шахтной системы теплоснабжения.

Как показал анализ современных публикаций, вопросы внедрения котлоагрегатов с НТКС в шахтных сетях теплоснабжения в качестве источников теплоты являются малоизученными. Сделан вывод, что на данный момент не существует эффективной методики определения рациональных режимов функционирования группы котлоагрегатов с НТКС. Также не существует математической модели производства теплоты котлоагрегатом с НТКС, которая учитывала бы состояние и параметры поверхностей нагрева котла. Решение этих вопросов имеет большой научный и практический интерес.

Цель работы – повышение эффективности производства теплоты котлоагрегатами с топками НТКС в шахтной системе теплоснабжения с помощью автоматического расчета и обеспечения рациональных режимов работы группы котлов.

Задачи исследования:

- провести аналитическое исследование технологических особенностей работы котлов с топками НТКС и их применения в системе теплоснабжения горного предприятия;
- разработать математическую модель распределения материальных и энергетических потоков при производстве теплоты котлоагрегатом с топкой НТКС для расчета значений технологических параметров топок и прогноза поведения слоя при различных комбинациях управляющих воздействий при переходе с одного режима на другой;
- провести экспериментальные исследования режимов работы топки НТКС при различных способах регулирования ее производительности;
- обосновать критерий оценки эффективности работы группы котлоагрегатов с НТКС, позволяющий комплексно учесть экономические показатели их работы, а также теплотехнические характеристики каждого котельного агрегата;
- обосновать и разработать метод поиска рационального состава группы работающих котельных агрегатов с топками НТКС и производительности каждого котла в зависимости от прогнозного теплового спроса абонентов шахты. На основании данного метода разработать методику расчетов;
- разработать структуру и принцип работы многоуровневой системы автоматического управления производством теплоты в шахтной системе теплоснабжения, а также ее техническую реализацию;
- оценить технико-экономическую эффективность от внедрения разработанной многоуровневой системы автоматического управления производством теплоты в шахтной системе теплоснабжения на базе топок НТКС.

ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА ТЕПЛОТЫ В ШАХТНОЙ СИСТЕМЕ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ КОТЛОАГРЕГАТАМИ С НТКС

2.1 Структурная идентификация системы теплоснабжения шахты

Для исследования процессов производства и распределения теплоты в шахтной системе теплоснабжения необходимо синтезировать математическую модель тепловой сети, которая позволяла бы прогнозировать динамические изменения в состоянии производителей и потребителей тепловой энергии.

Произведем структурную идентификацию объекта исследований. Шахтную сеть теплоснабжения в соответствии с выражением (1.2) условно можно разделить на следующие составляющие [56]: источники теплоты – котельные агрегаты с топками НТКС; трубопроводная сеть; тепловые абоненты – бойлер горячего водоснабжения, калориферная установка, шахтные здания и сооружения, потребляющие теплоту на отопление и вентиляцию [10, 102].

Теплота, полезная полученная от котлоагрегата, и переданная в тепловую сеть, как отмечалось в 1-ой главе, расходуется на следующие нужды: нагрев воды в отопительных приборах для нужд отопления и вентиляции, бойлерах, калориферной установке, а также непосредственно в трубопроводной сети.

На рисунке.2.1 представлена структурная схема шахтной системы теплоснабжения. Штриховой линией показаны потоки нагретого теплоносителя, который поступает от котлоагрегатов с НТКС в систему, а штрих-пунктирной представлены обратные потоки теплоносителя с расходом воды. Расход теплоносителя по каждому абоненту с отопительным прибором составляет $\sum_{j=1}^n g_j$,

общий расход теплоносителя в системе q_{Σ} , с учетом расходов на бойлер и калориферную установку соответственно q_{gvs} , и q_{kal} . Количество полезной теплоты, вносимой каждым котлоагрегатом с НТКС $Q_{pol.i}$ ($i = 1, 2...n$) с учетом массового (объемного) расхода твердого топлива B (V_{tt}), объемного расхода дутьевого воздуха V_{dv} , и коэффициента погружения ППН k_{ks} , а так же потерь теплоты при производстве $\sum Q_{pot.i}$.

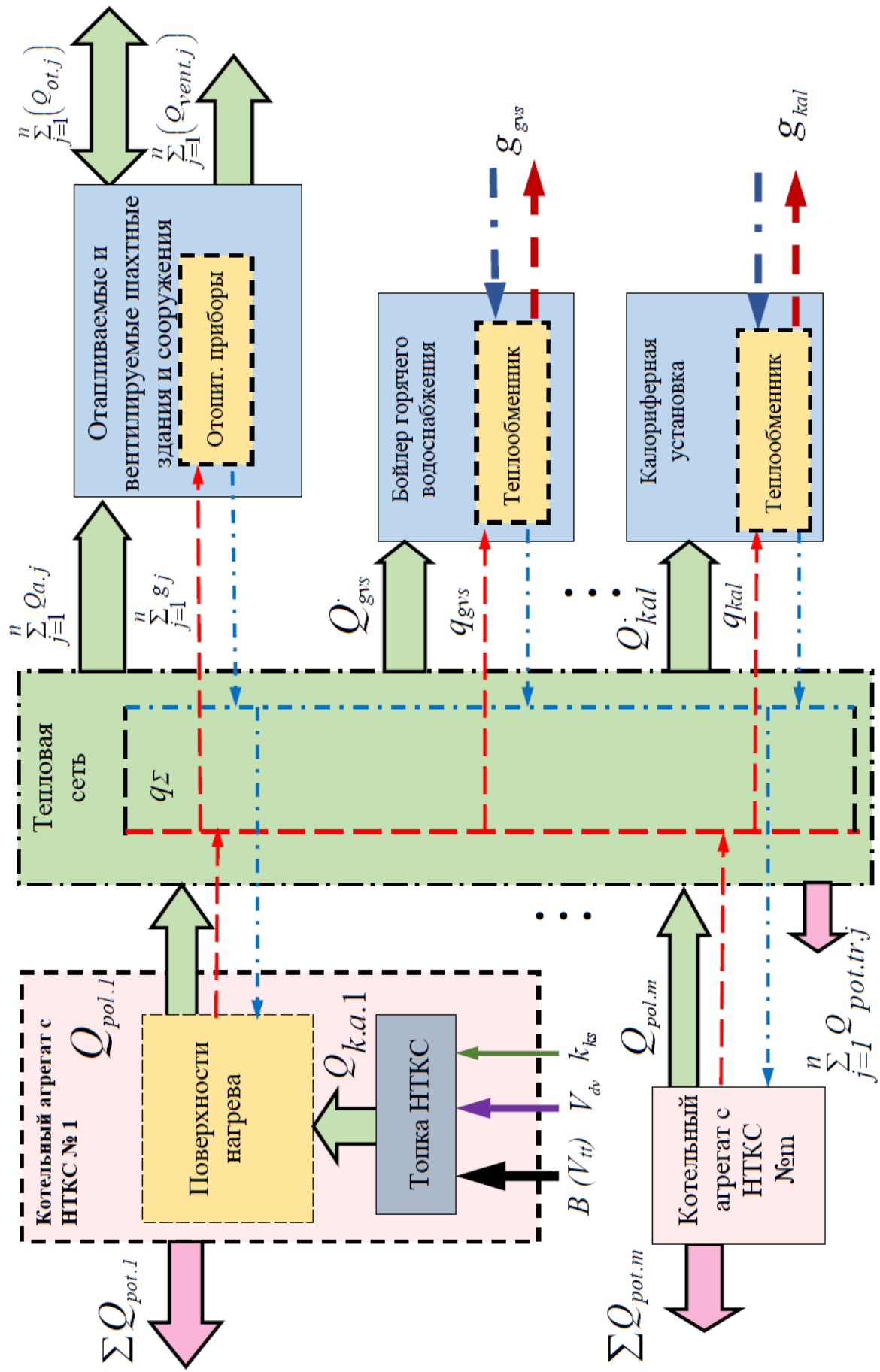


Рисунок 2.1 – Схема распределения энергетических и массовых потоков в шахтной системе теплоснабжения

Суммарное количество теплоты, потребляемой шахтными зданиями и сооружениями равно $\sum_{j=1}^n Q_{a.j}$. Данная теплота расходуется на отопление в количестве равно $\sum_{j=1}^n (Q_{ot.j})$ и на вентиляцию $\sum_{j=1}^n (Q_{vent.j})$. Суммарные потери теплоты в сети при его транспортировании равны $\sum_{j=1}^n Q_{pot.tr.j}$. Количество теплоты, идущей на горячее водоснабжение (воспринимаемое теплообменником бойлера) равно Q_{gvs} при расходе горячей воды g_{gvs} , количество теплоты, воспринимаемое калориферной установкой равно Q_{kal} при расходе воздуха на проветривание шахты g_{kal} .

Для установления зависимости количества теплоты, получаемой шахтными абонентами, от режимов работы котлоагрегатов с НТКС представим систему теплоснабжения шахты в виде системы дифференциальных уравнений, описывающих передачу и распределение энергетических потоков от источников к абонентам [122, 123, 126]. Воспользуемся уравнениями тепловых балансов структурных элементов модели [12, 70] (Рис.2.1).

Тепловой баланс котлоагрегатов с НТКС

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^m \frac{dQ_{pol.i}(\tau)}{d\tau} = \sum_{i=1}^m \left(Q_{k.a.i}(\tau) - Q_{pot.i}(\tau) \right); \\ \sum_{i=1}^m Q_{pol.i}(\tau) = Gc_v \left(t_v^n(\tau) - t_v^o(\tau) \right). \end{cases} \quad (2.1)$$

Тепловой баланс трубопроводной сети [84]

$$\begin{aligned} c_v m_v \frac{dt_v^s(\tau)}{d\tau} = Gc_v \left(t_v^n(\tau) - t_v^o(\tau) \right) - k_b F_b \left(t_v^s(\tau) - t_b(\tau) \right) - \\ - k_{kal} F_{kal} \left(t_v^s(\tau) - t_{kal}(\tau) \right) - k_{op} F_{op} \left(t_v^s(\tau) - t_{op}(\tau) \right), \end{aligned} \quad (2.2)$$

где c_v – теплоемкость воды, Дж/(кг·К);

G – массовый расход теплоносителя в системе, кг/с;

t_v^n – температура воды на входе к потребителям, °С;

t_v^o – температура обратной воды на входе в циркуляционную систему, °С;

t_v^s – средняя температура теплоносителя (воды) в тепловой сети, °С;

k_b – коэффициент теплообмена материала теплообменника бойлера, Дж/(К·м²);

k_{kal} – коэффициент теплообмена калориферной установки, Дж/(К·м²);

k_{op} – коэффициент теплообмена около внутренней стенки эквивалентного обогревательного прибора (радиатора), Дж/(К·м²);

F_b – площадь поверхности теплообменника бойлера, м²;

F_{kal} – площадь поверхности теплообмена калориферной установки, м²;

F_{op} – площадь внутренней поверхности обогревательного прибора, м²;

t_b – температура теплообменника бойлера, °С;

t_{kal} – температура теплообменника калориферной установки, °С;

t_{op} – температура внутренней стенки теплообменника обогревательного прибора, °С.

Тепловой баланс бойлера

$$c_v m_{gvs} \frac{dt_{gvs}(\tau)}{dt} = k_b F_b \left(t_v^s(\tau) - t_b(\tau) \right) - g_{gvs} c_v \left(t_b(\tau) - t_{gvs}(\tau) \right), \quad (2.3)$$

где m_{gvs} , t_{gvs} – масса, кг, и температура воды, °С, в бойлере горячего водоснабжения соответственно.

Тепловой баланс калориферной установки

$$c_{kal} m_{kal} \frac{dt_{kal}(\tau)}{d\tau} = k_{kal} F_{kal} \left(t_v^s(\tau) - t_{kal}(\tau) \right) - g_{vv} c_{vz} \left(t_{kal}(\tau) - t_{vn}(\tau) \right), \quad (2.4)$$

где c_{vz} – теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К);

c_{kal} , m_{kal} – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К), и масса, кг, теплообменника калориферной установки, соответственно;

Тепловой баланс отапливаемых отопительными приборами помещений [18, 93]

$$c_{op} m_{op} \frac{dt_{op}(\tau)}{d\tau} = k_{op} F_{op} \left(t_v^s(\tau) - t_{op}(\tau) \right) - k_{op}^k F_{op}^{vn} (t_{op}(\tau) - t_{pom}(\tau)) - k_{op}^l F_{op}^{vn} (t_{op}(\tau) - t_{sr}(\tau)); \quad (2.5)$$

$$c_{vz} m_{pom} \frac{dt_{pom}(\tau)}{d\tau} = k_{op}^k F_{op}^{vn} (t_{op}(\tau) - t_{pom}(\tau)) - k_{vo}^k F_{zk} (t_{pom}(\tau) - t_{zk}(\tau)) - k_{vo}^k F_{vk} (t_{pom}(\tau) - t_{vk}(\tau)) - k_{vo}^k F_{mk} (t_{pom}(\tau) - t_{mk}(\tau)) - c_{vz} \rho_{vz} g_{vent} (t_{pom}(\tau) - t_{vk}(\tau)), \quad (2.6)$$

где F_{op}^{vn} – площадь внешней поверхности обогревательного прибора, м²;

c_{op} , m_{op} – соответственно удельная теплоемкость, Дж/(кг·К) и масса стенки эквивалентного обогревательного прибора, кг;

k_{op}^k , k_{op}^l – коэффициенты конвективного, Дж/(К·м²), и лучевого, Дж/(К⁴·м²), теплообмена около внешней поверхности эквивалентного обогревательного прибора;

t_{pom} – температура внутреннего воздуха в здании, °С;

t_{sr} – среднерадиационная температура окружающих поверхностей, °С;

m_{pom} – масса воздуха в помещении, кг;

k_{vo}^k – коэффициент конвективного теплообмена на внутренних поверхностях ограждающих конструкций, Дж/(К·м²);

F_{zk} , F_{vk} , F_{mk} – площади соответственно внешних, внутренних ограждений и малотеплоемких ограждающих конструкций, м²;

t_{zk} , t_{vk} , t_{mk} – температуры на внутренних поверхностях соответственно внешних, внутренних и малотеплоемких ограждающих конструкций, °С;

g_{vent} – средний расход воздуха на вентиляцию шахтных зданий, м³/с;

ρ_{vz} – плотность воздуха, кг/м³.

Данная модель учитывает наиболее существенные потери теплоты при его производстве и распределении. Она позволяет определять инерционность тепловых абонентов, прогнозировать изменения температуры воздуха шахтных зданий и сооружений в зависимости от внешних возмущающих факторов; при переходе от дифференциальной к операторной форме является основой для разработки и исследования системы автоматического управления потокораспределением теплоносителя. Данная подсистема автоматизации является одним из элементов системы комплексной автоматизации процесса теплоснабжения шахты, и ее работа должна быть интегрирована с системой автоматического управления процессом производства теплоты группой котлоагрегатов с НТКС.

2.2 Идентификация и моделирование производства теплоты котлоагрегатом с НТКС

Целью разработки математической модели котлоагрегата с НТКС является исследование динамических изменений производительности котла в зависимости от комбинаций таких управляющих воздействий, как расход твердого топлива, скорость дутьевого воздуха и степень введения в слой ППН. Существующие на данный момент модели топок НТКС, как правило, имеют вид аналитических выражений [7, 20, 28, 29], которые не позволяют исследовать изменения производительности котлоагрегата при параллельном управлении по нескольким управляющим воздействиям. Так, традиционно с помощью дифференциального уравнения теплового баланса слоя возможно оценить изменение температуры t_{ks} НТКС в динамике [88]

$$\frac{dt_{ks}}{dt} S \rho_{ks} c_{ks} H = B_S Q_n^p S (1 - q_3 - q_4) - S \rho_{vz} c_{vz} v_{dv} (t_{ks} - t_{dv}) - q_z - q_L, \quad (2.7)$$

где t_{ks} – температура слоя, °С

c_{vz}, c_{ks} – теплоемкости воздуха и материала слоя (КС), Дж/(кг·К);

ρ_{vz}, ρ_{ks} – плотность воздуха и насыпная плотность материала КС, кг/м³;

S – площадь зеркала горения, м²;

H – высота слоя, м;

t_{dv} – температура дутьевого воздуха, °С;

Q_n^p – низшая теплота сгорания твердого топлива, Дж/кг;

B_S – расход топлива на 1 м² площади зеркала горения, кг/(м²·с);

v_{dv} – скорость дутьевого воздуха через слой, м³/с;

q_3, q_4 – доля соответственно химического и механического недожогов, %;

q_z, q_L – доли потери теплоты с отводимой золой и излучением, %.

Существенные недостатки данного вида матмодели следующие:

- удельные теплоемкости c_{vz} и c_{ks} зависят от температуры слоя и при изменениях t_{ks} существенно меняются, что вносит погрешности при вычислениях, поэтому целесообразно вместо теплоемкостей использовать удельные энтальпии реагентов НТКС, значения которых можно точно определять по специальным таблицам зависимостей [120];

- не учитывается разница в химическом составе дутьевого воздуха и исходящих из слоя дымовых газов, а, следовательно, и разница в удельной теплоемкости (энтальпиях) при определении теплоты, выносимой из слоя дымовыми газами (продукты сгорания с непрореагировавшим дутьевым воздухом);

- в промышленных условиях невозможно массовое дозирование расхода твердого топлива, а только объемное;

- не рассматривается изменение производительности топки с помощью погружения ППН;
- не рассматривается теплообмен между дымовыми газами и поверхностями нагрева, а также КС и погруженной частью ППН.

Следовательно, для решения поставленных задач исследования необходимо устранить вышеперечисленные недостатки и разработать адекватную математическую модель производства и распределения материальных и энергетических потоков в котлоагрегате с НТКС. Синтез модели будет производиться с учетом следующих исходных положений: исследуемый котлоагрегат с НТКС – водогрейный, в качестве твердого топлива рассматривается высокосольный уголь (или продукт обогащения), параметры модели рассчитываются исходя из определения массовых и энергетических составляющие на единицу времени.

Произведем структурную идентификацию котлогарегата. Для этого применим метод декомпозиции. На рисунке 2.2 приведена структурная схема распределения массовых и энергетических потоков в водогрейном котлоагрегате с НТКС.

Как видно из рисунка 2.2 в топку НТКС теплота поступает от двух источников:

- в результате сгорания забрасываемого в топку угля Q_{ugol} ;
- вносится вместе с дутьевым воздухом Q_{dv} .

При этом в расходной части теплового баланса присутствуют следующие составляющие:

- химический $Q_{h.n.}$ и физический недожоги $Q_{f.n.}$ твердого топлива;
- унос теплоты вместе с физической теплотой шлаков $Q_{f.sh}$;
- теплота, воспринятая погружными поверхностями нагрева ППН Q_{ppn}^{ks} ;
- потери теплоты в атмосферу Q_{atm} , потери теплоты вместе с исходящим дутьевым воздухом $Q_{is.vz}$ и потери теплоты вместе с продуктами сгорания $Q_{p.sg}$

$$Q_{atm} = Q_{is.vz} + Q_{p.sg} ,$$

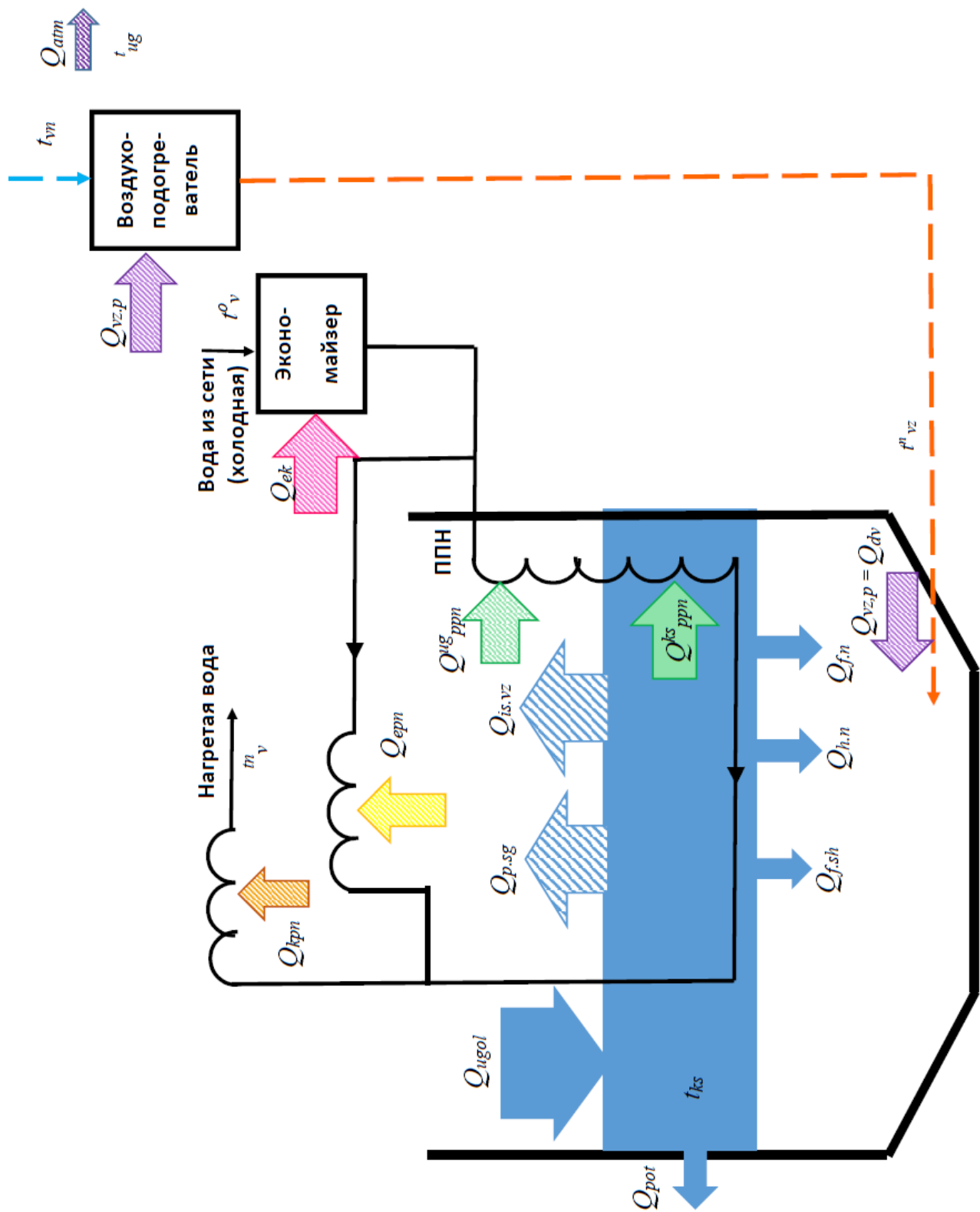


Рисунок 2.2 – Структурная схема распределения массовых и энергетических потоков в котлоагрегате НТКС

- теплота, теряемая на внешнее охлаждение и в циркуляционной системе котлоагрегата Q_{oh} .

Теплота, уходящая вместе с дымовыми газам, полезно воспринимается на нагрев теплоносителя в выведенной из слоя части ППН Q_{ppn}^{ug} , на нагрев теплоносителя в ЭПН Q_{epn} , на нагрев воды в экономайзере Q_{ek} , а также на нагрев дутьевого воздуха в воздухоподогревателе Q_{vzp} .

Составим уравнения массового баланса слоя во времени

$$\frac{dm_{ks}}{d\tau} = m_{ugol}(\tau) + m_{d.v}(\tau) - m_{zoli}(\tau) - m_{p.sg}(\tau) - m_{is.vz}(\tau), \quad (2.8)$$

где m_{ks} – масса НТКС, кг;

τ – время, с;

m_{ugol} – расход угля, вносимого в слой, кг/с;

$m_{d.v}$ – массовый расход дутьевого воздуха, вносимого в слой, кг/с;

m_{zoli} – расход золы, удаляемой из слоя, кг/с;

$m_{p.sg}$ – массовый расход продуктов сгорания, выносимых из слоя, кг/с;

$m_{is.vz}$ – массовый расход исходящего из слоя дутьевого воздуха, кг/с.

Запишем уравнение теплового баланса котла с НТКС на 1 кг внесенного топлива [112]. В приходной части находится теплота, получаемая при сгорании твердого топлива Q_{ugol} , Дж/кг, и внесенная с физической теплотой дутьевого воздуха после воздухоподогревателя Q_{dv} , Дж/кг. В расходной части находится теплота, которая полезно тратится на нагрев воды в ППН за счет теплообмена с кипящим слоем и с продуктами сгорания, соответственно Q_{ppn}^{ks} , Q_{ppn}^{ug} , Дж/кг, ЭПН – Q_{epn} , Дж/кг, КПН – Q_{kpn} , Дж/кг, экономайзере Q_{ek} , Дж/кг, а также на нагрев атмосферного воздуха в воздухоподогревателе Q_{vzp} , и потери теплоты с химическим $Q_{h.n.}$, Дж/кг, и физическим $Q_{f.n.}$, Дж/кг недожогом, $Q_{f.sh.}$ – потери теплоты с физической теплотой шлаков, Дж/кг, потери теплоты за счет внешнего охлаждения Q_{oh} , Дж/кг, потери теплоты вместе с продуктами сгорания и исходящим воздухом, соответственно $Q_{p.sg} + Q_{is.vz} = Q_{atm}$, Дж/кг.

Ввиду того, что воздух подогревается в воздухоподогревателе, который входит в состав котлоагрегата, и $Q_{dv} = Q_{vzp}$, то данное составляющее исключаются из уравнения баланса [112]:

$$Q_{ks} = Q_{ugol} - Q_{ppn}^{ks} - Q_{ppn}^{ug} - Q_{ek} - Q_{epn} - Q_{kpn} - Q_{h.n.} - Q_{f.n} - Q_{f.sh} - Q_{oh} - Q_{p.sg} - Q_{is.vz} . \quad (2.9)$$

Теплота, полезно расходуемая котлом на нагрев теплоносителя (воды) за единицу времени является суммой следующих элементов [112]

$$Q_{pol} = Q_{ppn} + Q_{ek} + Q_{epn} + Q_{kpn} = Gc_v(t_v^n - t_v^0), \quad (2.10)$$

где Q_{ppn} – теплота, воспринимаемая ППН за единицу времени, Вт;

Q_{kpn} – теплота, воспринимаемая КПН за единицу времени, Вт;

Q_{ek} – теплота, воспринимаемая за единицу времени ЭК, Вт;

Q_{epn} – теплота, воспринимаемая за единицу времени ЭПН нагрева, Вт;

G – массовый расход воды в системе, кг/с

c_v – теплоемкость воды, Дж/(кг·К);

t_v^n – температура нагретой воды, которая поступает потребителям, °С;

t_v^0 – температура холодной воды на входе в циркуляционную систему котла (в обратном трубопроводе), °С.

Поскольку ППН могут быть как частично, так и полностью погружены в КС, то теплоту, воспринимаемую ими, удобно разделить по происхождению от двух источников: полученную путем теплообмена с НТКС погруженной частью ППН; полученную путем теплообмена с продуктами сгорания выведенной из слоя частью ППН. Так, теплота, воспринимаемая ППН за единицу времени, определяется как

$$Q_{ppn} = Q_{ppn}^{ks} + Q_{ppn}^{ug} = F_{ppn} k_{ks} k_{ppn}^{ks} (t_{ks} - t_v^o) + \sigma_0 \alpha_{ppn}^{ks} F_{ppn} k_{ks} \left(\left(\frac{273 + t_{ks}}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + t_v^o}{100} \right)^4 \right) +$$

$$+ F_{ppn} (1 - k_{ks}) k_{ppn}^{ug} (t_{ks} - t_v^o) + \sigma_0 \alpha_{ppn}^{ug} F_{ppn} (1 - k_{ks}) \left(\left(\frac{273 + t_{ks}}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + t_v^o}{100} \right)^4 \right), \quad (2.11)$$

где F_{ppn} – площадь теплообмена ППН, м²;

k_{ks} – коэффициент погружения ППН в слой, %;

$k_{ppn}^{ks}, \alpha_{ppn}^{ks}$ – коэффициенты конвективного и лучевого теплообмена НТКС с ППН, Дж/(м²·К) и Дж/(м²·К⁴);

$\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) — коэффициент излучения абсолютно черного тела;

t_{ks} – температура кипящего слоя, °С;

$k_{ppn}^{ug}, \alpha_{ppn}^{ug}$ – коэффициенты конвективного и лучевого теплообмена уходящих газов с ППН, Дж/(м²·К), и Дж/(м²·К⁴), соответственно.

Аналогично, теплота, полезно воспринимаемая ЭПН определяется как сумма конвективной Q_{epn}^k и лучевой Q_{epn}^l составляющих

$$Q_{epn} = Q_{epn}^k + Q_{epn}^l = F_{epn} k_{epn}^{ug} (t_{ks} - t_{epn}^v) + \sigma_0 F_{epn} \alpha_{epn}^{ks} \left(\left(\frac{273 + t_{ks}}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + t_{epn}^v}{100} \right)^4 \right), \quad (2.12)$$

где $k_{epn}^{ug}, \alpha_{epn}^{ug}$ – коэффициенты конвективного и лучевого теплообмена уходящих газов с ЭПН, Дж/(м²·К) и Дж/(м²·К⁴), очевидно $k_{ppn}^{ug} = k_{epn}^{ug}$;

F_{epn} – площадь теплообмена ЭПН, м²;

t_{epn}^v – средняя температура воды в ЭПН, °С.

Средняя температура воды во фронтальных экранных поверхностях нагрева, рассчитывается как среднее значение

$$t_{epn}^v = \frac{t_v^n + t_v^o}{2}. \quad (2.13)$$

Теплота, воспринимаемая КПН за единицу времени, рассчитывается как

$$Q_{kpn} = F_{kpn} k_{kpn}^{ug} (t_{kpn}^{ug} - t_{kpn}^v), \quad (2.14)$$

где k_{kpn}^{ug} – коэффициент конвективного теплообмена КПН с уходящими газами, Дж/(м²·К);

F_{kpn} – площадь теплообмена КПН, м²;

t_{kpn}^v – средняя температура воды в конвективных поверхностях нагрева, °С;

t_{kpn}^{ug} – средняя температура уходящих газов на конвективных поверхностях нагрева, °С.

Теплота, отбираемая в единицу времени на полезный нагрев воды в экономайзере, рассчитывается как

$$Q_{ek} = k_{ek} F_{ek} \Delta t_{ek}, \quad (2.15)$$

где k_{ek} – коэффициент конвективного теплообмена экономайзера с уходящими газами, Дж/(м²·К);

F_{ek} – площадь теплообмена экономайзера, м²;

Δt_{ek} – изменение температуры воды в экономайзере, °С;

$$\Delta t_{ek} = \frac{(t_{ks} - t_v^n) + (t_{ug} - t_v^o)}{2}, \quad (2.16)$$

где t_{ug} – температура уходящих газов, °С.

С учетом вышеприведенных выкладок уравнение (2.9) приводится к дифференциальному виду

$$\begin{aligned} \frac{m_{ks} \cdot dI_{ks}(\tau)}{d\tau} = & m_{ugol}(\tau)Q_n^p - Q_{dv}(\tau) - m_z(\tau)c_z t_z - k_{h.n}m_{ugol}(\tau)Q_n^p - Q_{oh}(\tau) - \\ & - Q_{ppn}^{ug}(\tau) - Q_{epn}(\tau) - Q_{kpn}(\tau) - Q_{ek}(\tau) - F_{ppn}k_{ks}K_{ppn}^{ks} [t_{ks}(\tau) - t_v^o(\tau)] - \\ & - F_{ppn}k_{ks}\alpha_{ppn}^{ks} \left(\left(\frac{273 + t_{ks}(\tau)}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + t_v^o(\tau)}{100} \right)^4 \right) - m_{psg}I_{psg}(\tau) - m_{is.vz}I_{is.vz}(\tau), \end{aligned} \quad (2.17)$$

где I_{ks} – энтальпия кипящего слоя, Дж/кг;

Q_n^p – низшая теплотворная способность углей, Дж/кг;

$I_{is.vz}$ – энтальпия исходящего воздуха, Дж/кг;

c_z – теплоемкость золы, Дж/(кг·К);

t_z – температура золы, перед ее удалением из слоя, °С;

$I_{p.sg}$ – энтальпия продуктов горения, Дж/кг;

$k_{h.n.}$ – коэффициент химического недожога для НТКС, %.

Следовательно, уравнения (2.8) и (2.17) описывают в динамике массовый и энергетический балансы топки НТКС и вместе с уравнениями (2.10) - (2.16) составляют систему, которая при переходе от дифференциального к операторному виду, позволяет синтезировать динамическую модель производства и распределения теплоты в котлоагрегате с НТКС с учетом параметров поверхностей нагрева [107]. При начальных условиях и наложенных технологических ограничениях

$$\begin{aligned} t_{ks}(0) = t_{ks}^0; \quad m_{ugol}(0) = m_{ugol}^0; \quad m_{dv}(0) = m_{dv}^0; \quad k_{ks}(0) = k_{ks}^0; \\ t_{ks}^{\min} \leq t_{ks} \leq t_{ks}^{\max}; \quad 0 \leq m_{ugol} \leq m_{ugol}^{\max}; \quad m_{dv}^{\min} \leq m_{dv} \leq m_{dv}^{\max}; \quad 0 \leq k_{ks} \leq 1, \end{aligned} \quad (2.18)$$

где t_{ks}^0 , m_{ugol}^0 , m_{dv}^0 , k_{ks}^0 – соответственно, исходные значения: температуры НТКС, °С; массы вносимого в топку угля, кг/с; массы вносимого дутьевого воздуха, кг/с; степени погружения ППН в слой, %;

t_{ks}^{min} и t_{ks}^{max} ; m_{ugol}^{max} ; m_{dv}^{min} и m_{dv}^{max} – соответственно, минимальная и максимальная температуры существования НТКС, °С; максимально возможный по техническим характеристикам забрасывателя расход угля, кг/с; минимальный и максимальный расходы дутьевого воздуха, необходимые для поддержания НТКС в псевдоожиженном состоянии, кг/с. Их численные значения приведены в приложении А.

В соответствии с уравнениями (2.8) - (2.18) следует разработать структуру модели котлоагрегата с НТКС. Поскольку задачей исследований является получение динамических откликов по производительности котлоагрегата с НТКС на различные виды управляющих воздействий, то котел с НТКС целесообразно представить через передаточные функции его структурных единиц [39, 42]. В качестве управляющих величин приняты: объемный расход твердого топлива, что обусловлено невозможностью реализовать в промышленных условиях точного дозирования по массовому расходу; объемный расход дутьевого воздуха; степень погружения ППН в слой.

На рис.2.3. (а) представлена структура топки НТКС без учета наличия ППН, а на рис.2.3 (б) с учетом теплообмена КС и дымовых газов с ППН.

Исходя из рис.2.3 (а) топка представлена в виде совокупности передаточных звеньев в соответствии с выражениями (2.8) и (2.17). На основании методики структурно-параметрической идентификации передаточных функций по графикам переходных процессов [25] по результатам натурных испытаний (см. главу 3) был определен вид передаточных звеньев и значения постоянных коэффициентов, входящих в состав структуры модели топки НТКС (рис.2.3, а).

Количество теплоты Q_{tt} , Вт, производимого топкой НТКС по каналу управления ее производительностью изменением объемного расхода твердого топлива V_{tt} , м³/с, описывается передаточной функцией вида:

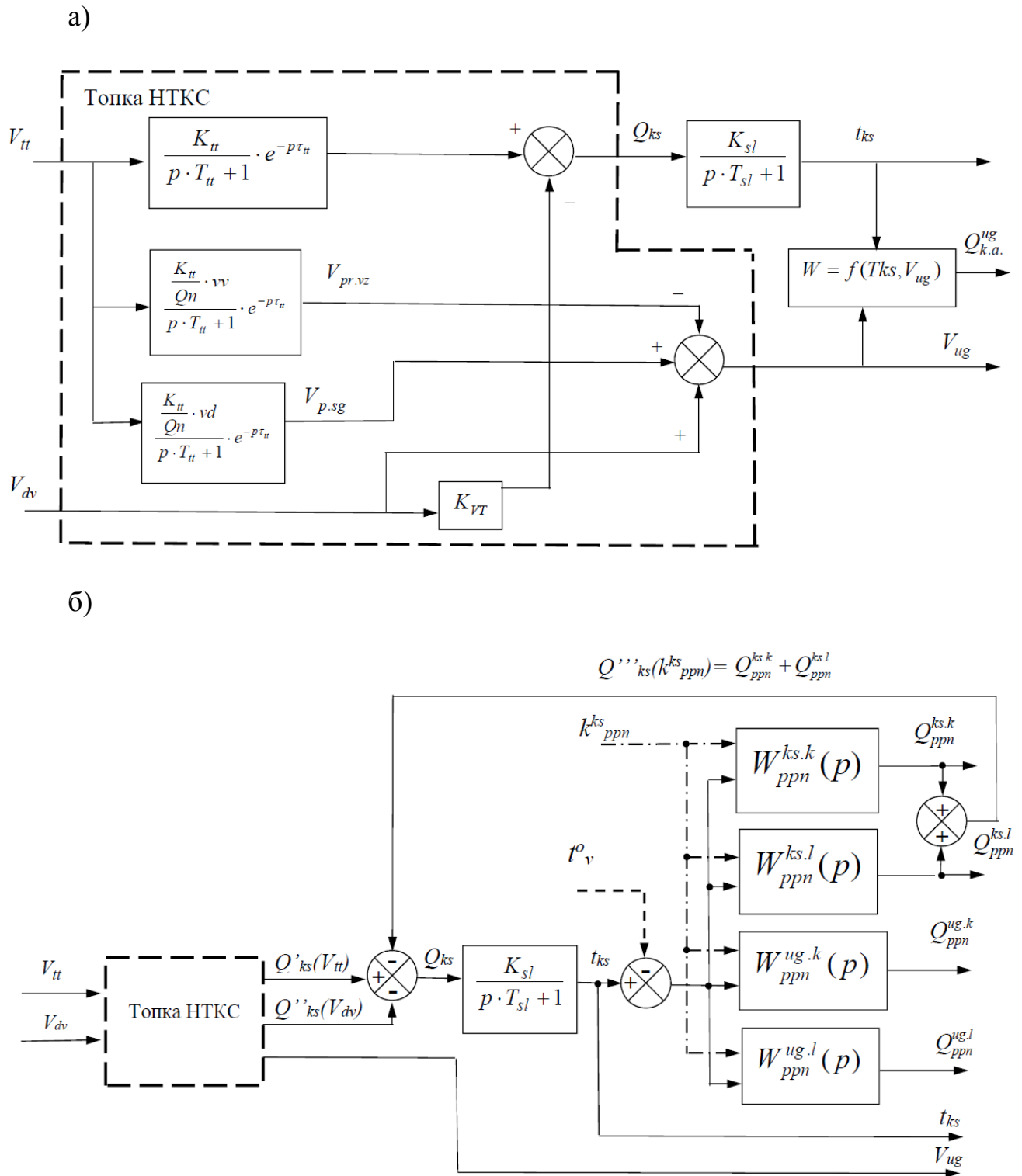


Рисунок 2.3 – Структура модели топки НТКС:

а) Структура топки НТКС без учета параметров ППН; б) Структура топки НТКС с учетом параметров ППН

$$W(p)_{V_{tt}-Q_{tt}} = \frac{K_{tt}}{p \cdot T_{tt} + 1} \cdot e^{-p \tau_{tt}}, \quad (2.19)$$

где K_{tt} – передаточный коэффициент по каналу «объемный расход твердого топлива – изменение производительности топки», Дж/(м³·с);

T_{tt} – постоянная времени по данному каналу, с;

τ_{tt} – время запаздывания по данному каналу, с.

Количество теплоты Q_{tt} , получаемой топкой по каналу расхода дутьевого воздуха V_{dv} , м³/с, описывается безинерционным звеном вида

$$W_{V_{dv}-Q_{tt}}(p) = -K_{VT}, \quad (2.20)$$

где K_{VT} – передаточный коэффициент по каналу «объемный расход дутьевого воздуха – производительность топки», Дж/(м³·с).

Поскольку есть необходимость расхода теплоты на прогрев воздуха до температуры слоя, то увеличение расхода дутьевого воздуха приводит к уменьшению теплоты в слое, что отражает знак «-» перед коэффициентом K_{VT} .

Количество дымовых газов определяется как сумма непрореагировавшего дутьевого воздуха и продуктов сгорания. Для этого в модель вводится два передаточных звена. Передаточная функция по каналу «изменение объемного расхода твердого топлива V_{tt} – объем прореагировавшего воздуха $V_{pr.vz}$ »

$$W_{V_{tt}-V_{pr.vz}}(p) = -\frac{\frac{K_{tt}}{Q_n^p} \cdot v_v}{T_{tt} \cdot p + 1} \cdot e^{-\tau_{tt} \cdot p}, \quad (2.21)$$

где $\frac{K_{tt}}{Q_n^p} \cdot v_v$ – передаточный коэффициент по каналу «изменение объемного расхода твердого топлива – объем прореагировавшего воздуха»;

v_v – минимальный объем воздуха, требуемый на 1 кг топлива, м³/кг.

Передаточная функция по каналу «изменение объемного расхода твердого топлива V_{tt} – объем продуктов сгорания $V_{p.sg}$ »

$$W_{V_{tt}-V_{p.sg}}(p) = -\frac{\frac{K_{tt}}{Q_n} \cdot \nu d}{T_{tt} \cdot p + 1} \cdot e^{-\tau_{tt} \cdot p}, \quad (2.22)$$

где $\frac{K_{tt}}{Q_n} \cdot \nu d$ – передаточный коэффициент по каналу «изменение объемного расхода твердого топлива – объем продуктов сгорания»;

νd – объем продуктов сгорания, получаемый на 1 кг топлива, м³/кг.

Таким образом, объем уходящих дымовых газов равен

$$V_{ug} = V_{dv} - V_{pr.vz} + V_{p.sg}. \quad (2.23)$$

Температура кипящего слоя определяется по каналу «изменение аккумулированной НТКС теплоты Q_{tt} – температура НТКС t_{ks} »

$$W_{Q_{tt}-t_{ks}}(p) = \frac{K_{sl}}{T_{sl} \cdot p + 1}, \quad (2.24)$$

где K_{sl} – передаточный коэффициент по каналу «воспринятая НТКС теплота – температура НТКС», °С/Вт;

T_{sl} – постоянная времени по данному каналу, с.

Теплота $Q_{k.a.}$, воспринятая уходящими дымовыми газами в топочном пространстве, представлена в обобщенном виде, как функция от температуры НТКС и объема уходящих дымовых газов V_{ug} , м³

$$W(p)_{Q_{k.a.-t_{ks};V_{ug}}} = f(t_{ks}; V_{ug}). \quad (2.25)$$

Функция 2.25 будет иметь табличный вид, поскольку теплота, уносимая с дымовыми газами, является функцией от удельной энтальпии уходящих газов, значения которой в соответствии со значениями температуры задаются в виде массива в среде MatLab

$$Q_{k.a.} = I_{ug} V_{ug}; \quad (2.26)$$

где $I_{ug} = f(t_{ks})$ – удельная объемная энтальпия уходящих газов, кДж/м³.

Поскольку инерционность процесса теплопередачи от слоя к уходящим газам пренебрежительно мала по сравнению с временной задержкой выделения теплоты в результате горения твердого топлива в слое, то передаточная функцию (2.26) представлена как безинерционное звено.

На рисунке 2.4 представлена структура котла с НТКС с учетом теплообмена КС и уходящих газов с ППН, ЭПН, КПН и ЭК. На рисунке 2.4 приняты условные обозначения: V_{tt} – объемный расход твердого топлива; V_{dv} – объемный расход дутьевого воздуха; $Q'_{ks}(V_{tt})$ – количество теплоты вносимой в слой от сгорания твердого топлива; $Q''_{ks}(V_{dv})$ – количество теплоты отводимой из слоя с дутьевым воздухом; Q_{ks} – количество теплоты получаемой слоем в единицу времени; t_{ks} – температура НТКС; t^o_v – температура воды в обратном трубопроводе; t^n_v – температура нагретой воды; t^{ek}_v – температура воды после экономайзера; $t_v^{ppn+epn}$ – температура воды после ППН и ЭПН; t'_{ug} – температура уходящих газов после ЭПН; t''_{ug} – температура уходящих газов после КПН; t_{ug} – температура уходящих газов на выходе из котлоагрегата; V_{ug} – расход уходящих дымовых газов.

Аналогично выражению (2.18), все зависимости, описывающие конвективный теплообмен уходящих газов, а также лучевой теплообмен КС с поверхностями нагрева (Рис.2.3, б и Рис.2.4) представлены в виде безинерционных передаточных звеньев в соответствии с выражениями (2.11)-(2.16). Так, передаточные функции тепловосприятия ППН по четырем каналам имеют вид:

$W_{ppn}^{ks,k}(p) = f(t_{ks}; t_v^{ek}; k_{ppn}^{ks})$ – при конвективном теплообмене НТКС с погруженной частью ППН (количество воспринятой теплоты – $Q_{ppn}^{ks,k}$);

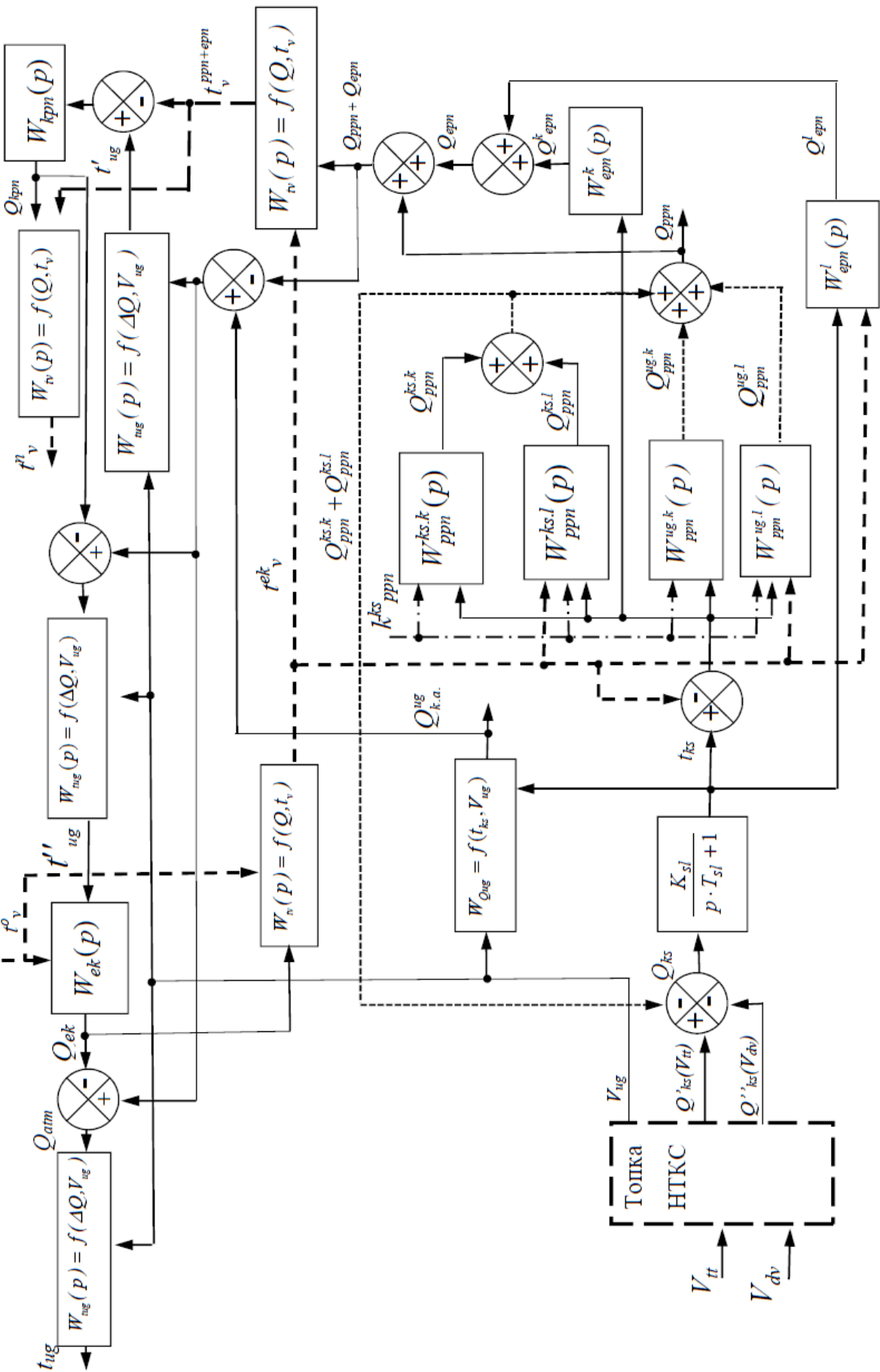


Рисунок 2.4 – Структура модели водогрейного котлагрегата НТКС с поверхностями нагрева через звенья управления

$W_{ppn}^{ks.l}(p) = f(t_{ks}; t_v^{ek}; k_{ppn}^{ks})$ – при лучевом теплообмене НТКС с погруженной частью ППН (количество воспринятой теплоты – $Q_{ppn}^{ks.l}$);

$W_{ppn}^{ug.k}(p) = f(t_{ks}; t_v^{ek}; k_{ppn}^{ks})$ – при конвективном теплообмене уходящих газов с непогруженной частью ППН (количество воспринятой теплоты – $Q_{ppn}^{ug.k}$);

$W_{ppn}^{ug.l}(p) = f(t_{ks}; t_v^{ek}; k_{ppn}^{ks})$ – при лучевом теплообмене уходящих газов с непогруженной частью ППН (количество воспринятой теплоты – $Q_{ppn}^{ug.l}$).

Полное тепловосприятие ППН – Q_{ppn} ; $W_{Qug} = f(t_{ks}, V_{ug})$ – передаточная функция по количеству воспринятой от слоя уходящими газами теплоты, $Q_{k.a.}^{ug}$ – теплота воспринятая уходящими газами; $W_{epn}^k(p)$, $W_{epn}^l(p)$, $W_{kpn}(p)$, $W_{ek}(p)$ – передаточные функции по тепловосприятию: ЭПН при конвективном теплообмене с уходящими газами (количество воспринятой теплоты – Q_{epn}^k), ЭПН при лучевом теплообмене с НТКС (количество воспринятой теплоты – Q_{epn}^l), КПН (количество воспринятой теплоты – Q_{kpn}) и ЭК (количество воспринятой теплоты – Q_{ek}), соответственно; передаточные функции вида $W_{tv} = f(Q, t_v)$, определяющие значение температуры воды на выходе из поверхности нагрева; передаточные функции вида $W_{tug} = f(\Delta Q, V_{ug})$, определяющие значения температур уходящих газов после каждой поверхности нагрева.

Для получения графических зависимостей изменения управляемых параметров в зависимости от комбинации управляющих воздействий в котлоагрегате с НТКС необходимо произвести параметрическую идентификацию котлоагрегата. При этом будут использованы два метода – метод прямого расчета коэффициентов [59, 98] по справочным данным [26, 46, 48, 64, 105, 120, 121] и известным аналитическим зависимостям [51, 69, 80, 85, 112], а также метод – параметрической идентификации ненаблюдаемых величин по графикам переходных процессов, полученных в результате эмпирических наблюдений при натурных испытаниях работы топки НТКС [25, 89]. Параметрическая идентификация коэффициентов матмодели котлоагрегата с НТКС, определяемых

вторым методом, подробно рассматривается в главе 3. Ниже рассмотрено получение численных значений коэффициентов модели методом прямого расчета.

Исследования работы котлоагрегата с НТКС будут проводиться при условии использования в качестве топлива промышленного продукта мокрого обогащения с рабочими характеристиками, приведенными в приложении А. Постоянные коэффициенты передаточных функций структурных звеньев котлоагрегата с НТКС рассчитываются в соответствии со справочными данными [105, 119, 120], в том числе на основании известных скалярных значений величин, характеризующих:

1) выбранную марку топлива

Q_n^p – низшая теплота сгорания топлива, Дж/кг;

Wp – влажность топлива, %;

Ap – зольность топлива, %;

$\nu\nu$ – требуемый объем воздуха для полного сгорания 1 кг топлива, м³/кг;

νd – объем продуктов сгорания, получаемых на 1 кг топлива, м³/кг;

2) параметры выбранного котлоагрегата с НТКС:

Q_{pol}^n – номинальная мощность, Вт;

$F_{ppn}, F_{epn}, F_{kpn}, F_{ek}$ – площади ППН, ЭПН, КПН и ЭК, соответственно, м²;

G – массовый расход воды в системе, кг/с;

t_v^n, t_v^o – температуры нагретой и холодной воды на выходе и входе, соответственно, в циркуляционную систему котла, °С;

3) физические константы и коэффициенты теплообмена [26, 64], в том числе:

k_{ppn}^{ks} – коэффициент конвективного теплообмена НТКС с ППН, Вт/(м²·К);

α_{ppn}^{ks} – коэффициент лучевого теплообмена НТКС с ППН, Вт/(м²·К);

k_{ppn}^{ug} – коэффициент конвективного теплообмена уходящих газов с поверхностями нагрева, Вт/(м²·К);

α_{ppn}^{ug} – коэффициент лучевого теплообмена уходящих газов с поверхностями нагрева, Вт/(м²·К⁴).

Также в качестве исходных данных для построения матмодели котлоагрегата с НТКС используются векторные значения:

I_{dv}^v - объемная энтальпия дутьевого воздуха, Дж/м³;

$I_{p.sg}^v$ - объемная энтальпия продуктов сгорания для данного вида топлива, Дж/м³.

Возможные температуры в установке и окружающей среде вводятся в виде одномерного массива значений t , °С с постоянным шагом. Для данных температур в виде массивов зависимостей задаваемой величины от температуры задаются $I_{dv}^v = f(t)$ и $I_{p.sg}^v = f(t)$. Численные значения и аналитические зависимости величин, используемых при моделировании работы котла с НТКС приведены в приложении А.

2.3 Исследование работы котлоагрегата с НТКС в среде MATLAB

Целью исследования является изучение характера изменений производительности топки НТКС в динамике при различных комбинациях управляющих воздействий и различных исходных состояниях. При проводимом имитационном моделировании исследовались динамические изменения следующих величин: температура НТКС, расход дымовых газов, тепловая производительность топки, количество теплоты, передаваемое поверхностям нагрева.

На рисунке 2.5 представлена структурная схема топки НТКС в программе MatLab [24, 59, 60] без учета наличия ППН, что довольно часто имеет место при эксплуатации котлоагрегатов. На рисунке 2.6 представлена структурная схема топки НТКС с ППН в программе MatLab, на схеме реализованы контуры конвективного и лучевого теплообмена ППН с кипящим слоем с учетом степени их погружения в слой. Рисунок 2.7 иллюстрирует типовую структурную схему поверхности нагрева на примере экономайзера в программе MatLab, в которой реализован конвективный теплообмен с уходящими газами.

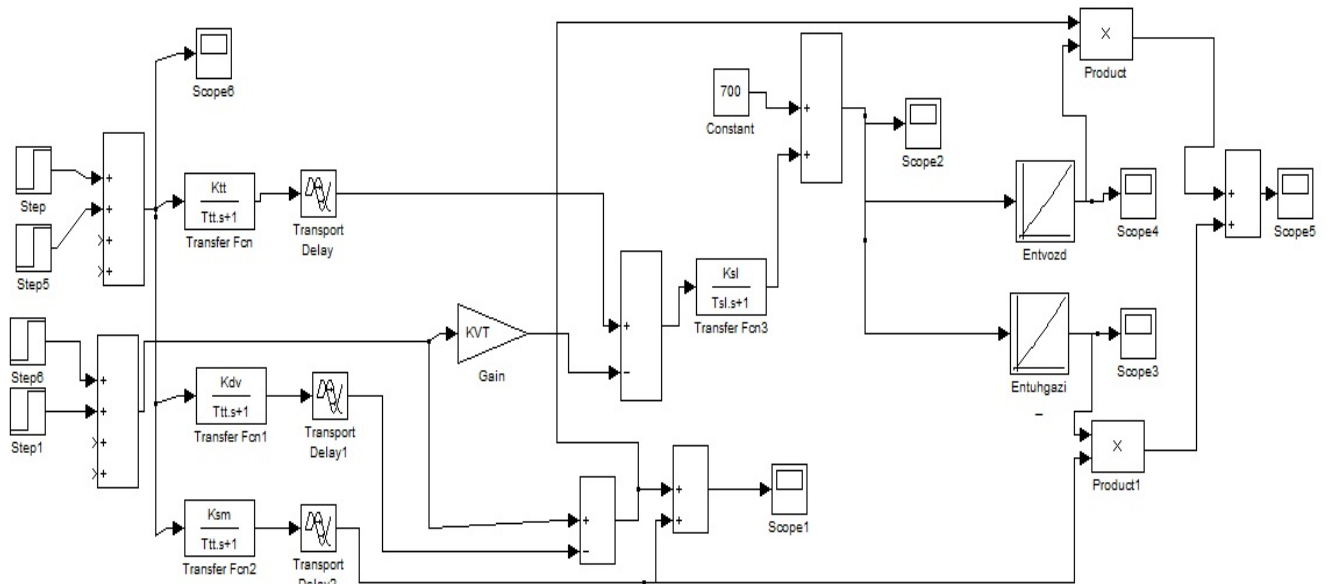


Рисунок 2.5 – Структурная схема топки НТКС в программе MatLab

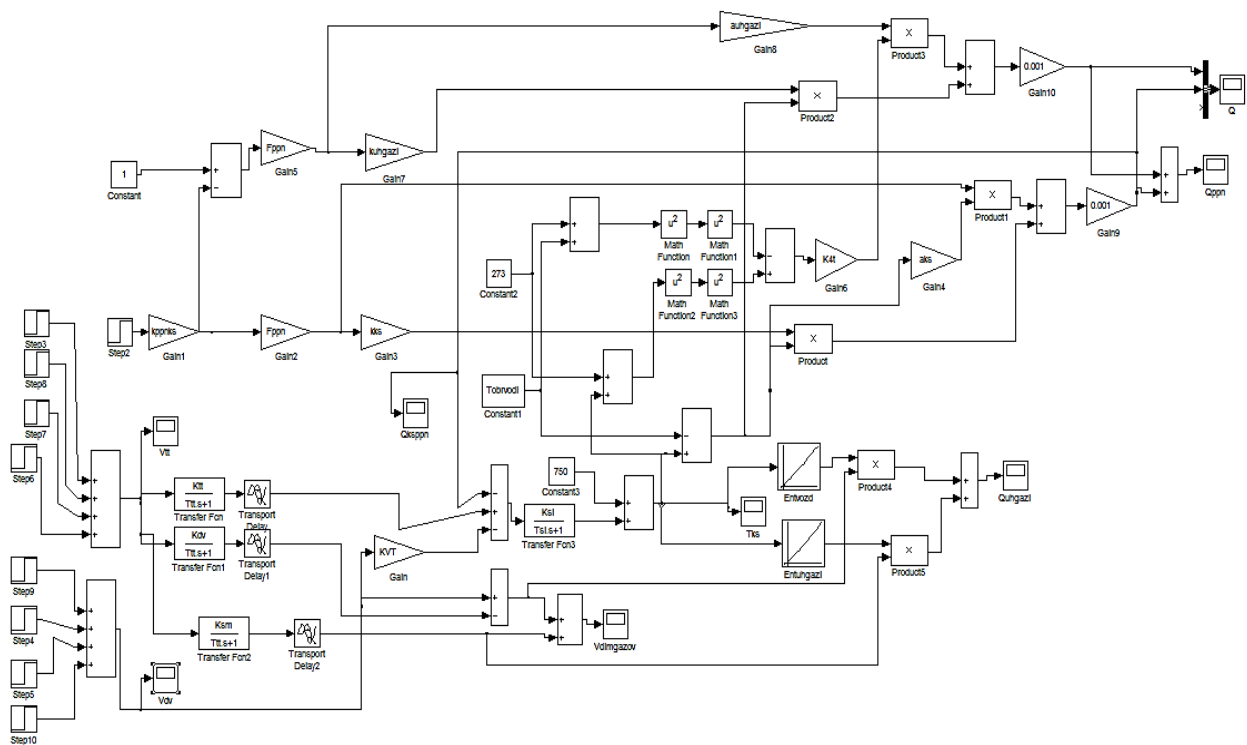


Рисунок 2.6 - Структурная схема топки НТКС с ППН в программе MatLab

Вначале следует провести компьютерные исследования работы котлоагрега – рассмотрим динамику изменения температуры кипящего слоя и производительности котла при непогруженных ($k_{ks} = 0$) в слой ППН (Рис.2.8 и Рис. 2.9).

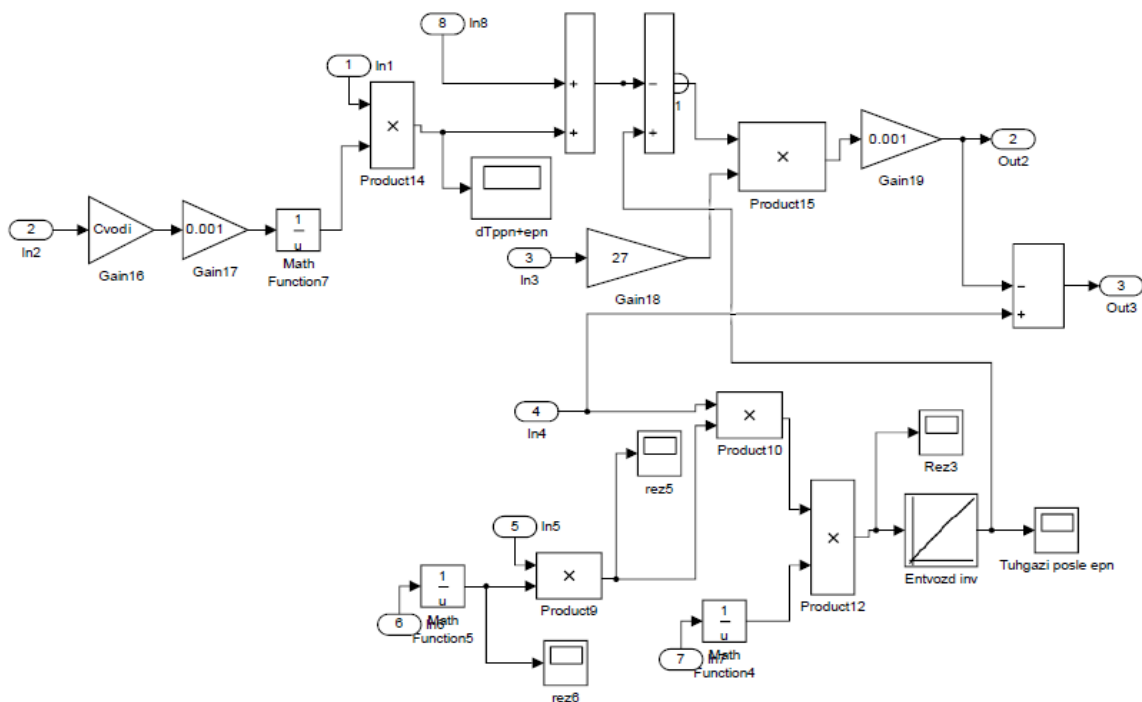


Рисунок 2.7 – Структурная схема поверхности нагрева на примере ЭПН в программе MatLab

Участок АВ на графиках характеризует стационарное состояние НТКС при полностью выведенных ППН, и минимально возможным по условиям существования слоя $V_{tt} = 85 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ и $V_{dv} = 1 \text{ м}^3/\text{с}$. В момент времени В происходит ступенчатое изменение V_{tt} на $+20 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$, а в момент времени С происходит ступенчатое изменение V_{dv} на $+0,1 \text{ м}^3/\text{с}$. На рисунке 2.8 участок ВС характеризует нелинейное (апериодическое) нарастание до устойчивого состояния температуры НТКС при увеличении V_{tt} , участок CD характеризует нелинейное уменьшение температуры НТКС при увеличении V_{dv} . На рисунке 2.9 участок ВС характеризует аналогичное нарастанию температуры НТКС нарастание производительности котла Q_{pol} , участок CDE – характеризует

нелинейное с перерегулированием (вершина D) возрастание производительности котлоагрегата при увеличении V_{dv} .

Начало моделирования начинается в момент времени 2000 с, что обуславливается необходимостью первоначального прогрева слоя до минимальной температуры устойчивого состояния $t_{ks} = 750^{\circ}\text{C}$.

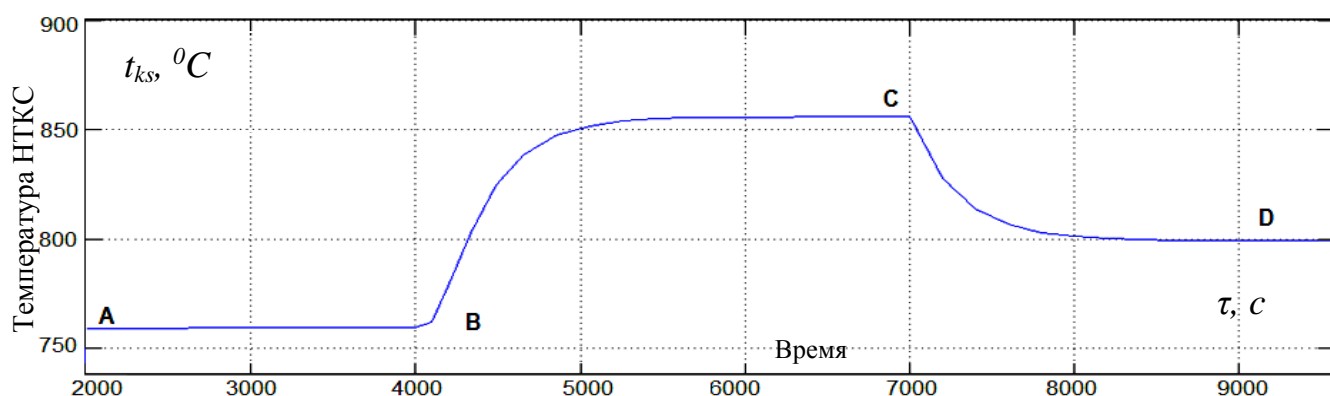


Рисунок 2.8 – График переходного процесса изменения температуры НТКС во времени $t_{ks}=f(\tau)$

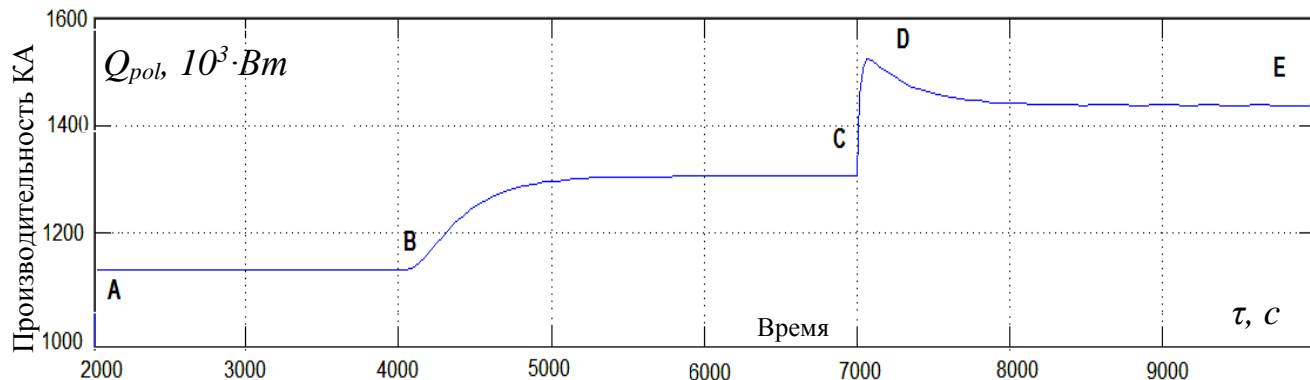


Рисунок 2.9 – График переходного процесса изменения производительности котлоагрегата с НТКС $Q_{pol}=f(\tau)$

Таким образом, получены и проанализированы графики динамических изменений основных параметров котла при их комбинации, обеспечивающей минимальную текущую мощность (участок АВ). Изучена реакция котла, на управляющие воздействия, увеличивающие его производительность.

Ниже рассмотрены динамические изменения технологических параметров котлоагрегата при полностью погруженных в слой ППН, что обеспечивает работу

котла с максимально возможной по конструктивным характеристикам производительностью. На рисунке 2.10 приведен график переходного процесса изменения температуры слоя при $k_{ks} = 1$ от 750°C (участок АВ) ступенчатым увеличением от $V_{tt} = 117 \cdot 10^6 \text{ м}^3/\text{с}$ до $V_{tt} = 167 \cdot 10^6 \text{ м}^3/\text{с}$ и минимально возможном по условиям существования КС расходе дутьевого воздуха $V_{dv} = 1 \text{ м}^3/\text{с}$. В соответствии с полученным графиком, при такой комбинации управляющих величин по окончании переходного процесса (участок ВС) температура слоя стабильно держится на верхнем допустимом уровне $t_{ks} = 950^{\circ}\text{C}$ (участок CD). Из рисунка 2.11 очевидно, что в этом опыте характер изменения полезной производительности котлоагрегата во времени аналогичен изменениям температуры, что обусловлено постоянным расходом дутьевого воздуха.

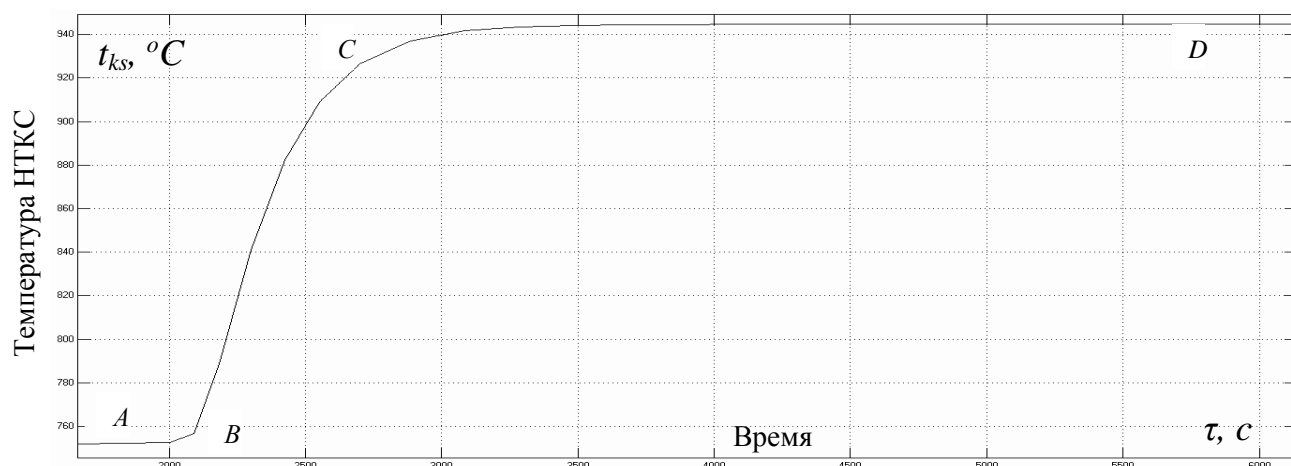


Рисунок 2.10 – График переходного процесса изменения температуры НТКС во времени $t_{ks} = f(\tau)$

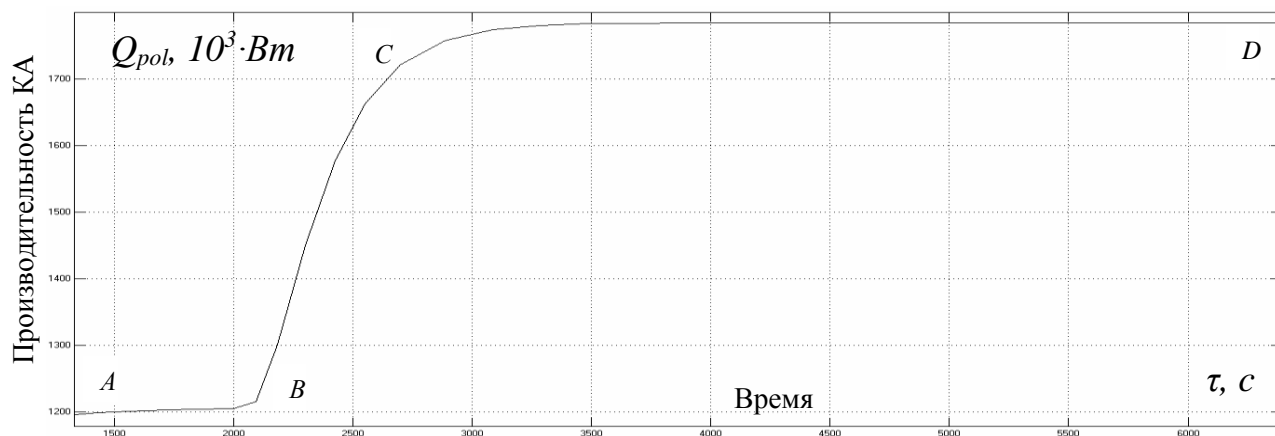


Рисунок 2.11 – График переходного процесса изменения производительности котлоагрегата с НТКС $Q_{pol} = f(\tau)$

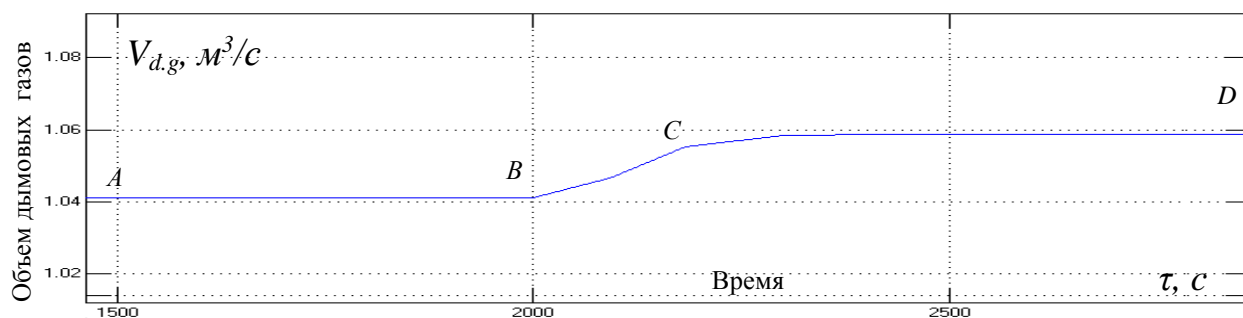


Рисунок 2.12 – График переходного процесса изменения объема дымовых газов во времени $V_{d.g.}=f(\tau)$

Из рисунка 2.12 следует, что объем дымовых газов несколько превышает исходный объем дутьевого воздуха $V_{dv} = 1 \text{ м}^3/\text{с}$, что объясняется термическим разложением угля и выходом летучих.

На следующем этапе исследовали переходные процессы при выходе котла из текущего стабильного режима на максимально возможную полезную производительность. ППН при этом полностью погружены в слой, а температура КС и расход дутьевого воздуха – должны иметь максимально возможные по условиям существования кипящего слоя значения. На рисунке 2.13 приведен график переходного процесса изменения температуры слоя при $k_{ks} = 1$ от $t_{ks} = 750^\circ\text{C}$ (участок АВ) и ступенчатым увеличении V_{tt} от $V_{tt} = 200 \cdot 10^6 \text{ м}^3/\text{с}$ до $V_{tt} = 255 \cdot 10^6 \text{ м}^3/\text{с}$ и максимально возможном по условиям существования КС увеличении расхода дутьевого воздуха от $V_{dv} = 1 \text{ м}^3/\text{с}$ до $V_{dv} = 2,5 \text{ м}^3/\text{с}$.

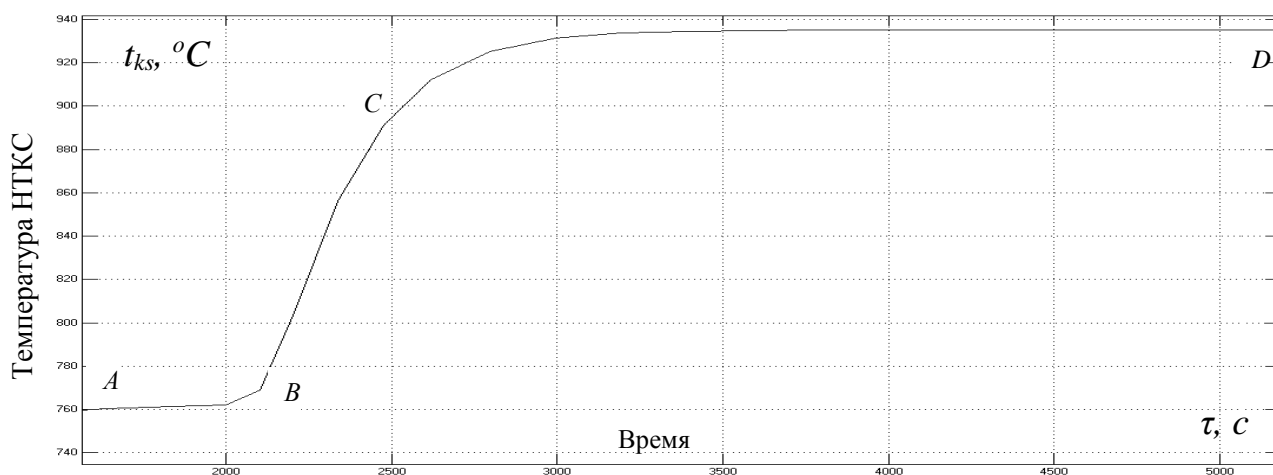


Рисунок 2.13 – График переходного процесса изменения температуры НТКС во времени $t_{ks}=f(\tau)$

Из рисунка 2.13 следует, что комбинация указанных значений управляющих величин после окончания переходного процесса (участок BC) обеспечивает стабильное значение температуры КС около верхнего допустимого уровня $t_{ks} = 950^{\circ}\text{C}$ (участок CD). Из рисунка 2.14 следует, что переходный процесс изменения производительности котла при выходе на максимальную полезную производительность котлоагрегата Q_{pol} стабильный и без перерегулирования.

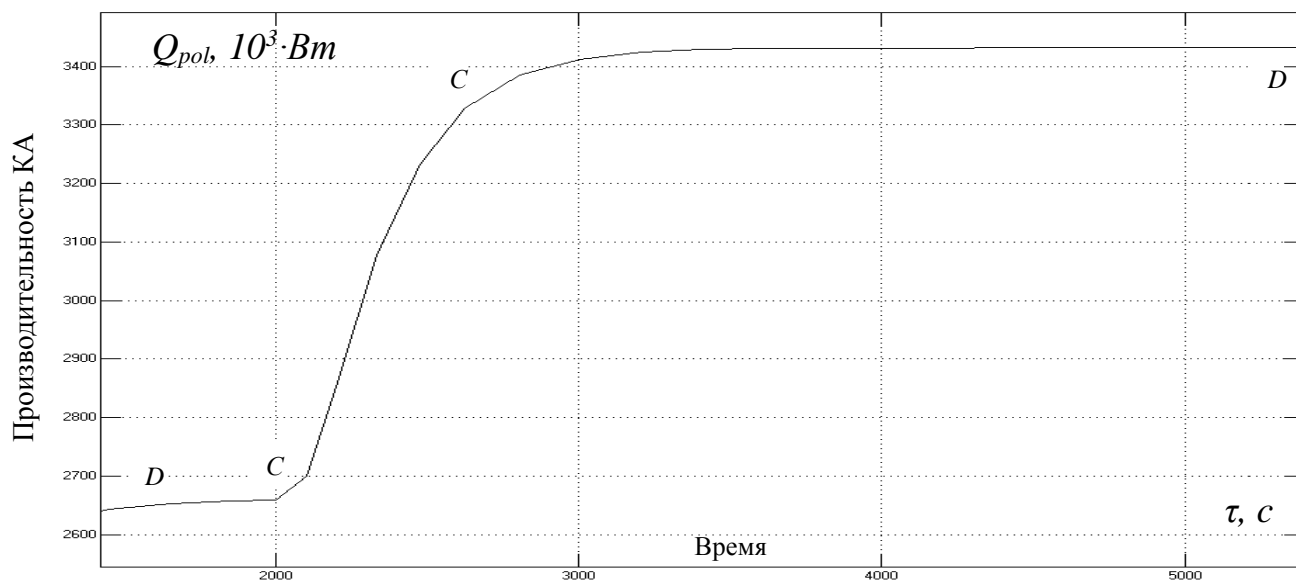


Рисунок 2.14 – График переходного процесса изменения производительности котлоагрегата с НТКС $Q_{pol} = f(\tau)$

Таким образом, была разработана и реализована математическая модель котлоагрегата с НТКС в программном пакете расширений MatLab Simulink.

Результаты компьютерного моделирования показывают, что наибольшую точность регулирования и устойчивость переходных процессов возможно получить путем комбинированного управления расходом твердого топлива и скорости дутьевого воздуха. Наибольшая глубина регулирования обеспечивается путем изменения степени погружения ППН в слой, однако подобные изменения следует сопровождать одновременным изменением остальных управляющих воздействий, чтобы избежать выхода технологических параметров слоя за границы существования. Также из результатов моделирования следует, что при одновременном регулировании производительности котла, процесс выхода на

заданный режим монотонный без перерегулирования (Рис.2.10...2.14), что исключает возникновение аварийной ситуации, а в случае управления производительностью котла по какому-либо одному управляющему воздействию может иметь место перерегулирование (Рис. 2.9), что может привести к созданию аварийной ситуации и неконтролируемым отклонениям управляемой величины от заданного результата.

Стабильность и монотонность переходных процессов котла, а также требуемые точность и быстродействие при выходе на требуемую производительность могут быть обеспечены путем автоматического управления.

2.4 Выводы по второй главе

1. Разработана математическая модель производства и передачи теплоты в котлоагрегате с НТКС, которая отличается от существующих моделей топок НТКС возможностью регулировать производительность по трем параметрам;

2. Данная модель получена на основе уравнений теплового и материального балансов системы теплоснабжения шахты, что позволяет получить передаточные функции элементов комплекса теплоснабжения шахты и исследовать динамические характеристики элементов.

3. Предложенная модель позволяет рассчитывать итоговое значение ожидаемой полезной производительности котлоагрегата и значения других технологических параметров при различных комбинациях управляющих воздействий, а также определять динамический характер их изменений при переходных процессах с одного рабочего режима на другой, в зависимости от комбинации управляющих воздействий и выбирать наиболее рациональную.

4. Получены графики переходных процессов в топке НТКС при различных видах регулирования, которые наглядно демонстрируют динамику изменения технологических параметров КА с НТКС при осуществлении управляющего воздействия.

ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ КОТЛОАГРЕГАТА С НТКС

3.1 Методика проведения эксперимента и обработки результатов исследований работы топки НТКС

В промышленных условиях была проведена экспериментальная проверка адекватности разработанной модели топки НТКС. В качестве объекта исследований была выбрана котельная установка шахты 4-21 ГП «Шахтоуправление «Южнодонбасское» №1» (г. Донецк). В ходе экспериментов были изучены динамические свойства топки НТКС при различных видах управления ее производительностью. Методика проведения эксперимента и результаты исследований приведены в приложениях Б и В.

При оценке адекватности разработанной математической модели топки осуществлялось следующее:

- производили периодические измерения и регистрацию значений температуры слоя при условии нормального функционирования топки в переходных режимах;
- результаты измерений обрабатывали для получения необходимых характеристик, чтобы оценить соответствие разработанной модели и фактического объекта;
- исследовали поведение топки НТКС в динамике с помощью разработанной модели для тех же условий, которые существовали при экспериментальных исследованиях;
- определили дисперсии воспроизводимости экспериментальных значений; дисперсии адекватности реальных характеристик топки НТКС и характеристик, полученных в результате моделирования;
- проверили однородность дисперсии адекватности с использованием критерия Фишера.

В качестве средств измерения технологических параметров топки НТКС

использовали следующие датчики:

- термоэлектрический преобразователь ТХА706-02 со вторичным прибором КВП1 для измерения температуры НТКС;
- камерная диафрагма ДК16-150-II, дифференциальный манометр ДМ3583М, вторичный прибор КВД1 для определения производительности дутьевого вентилятора;
- ртутный технический термометр типа П-5 для измерения температуры окружающей среды.

Для оценки расхода твердого топлива использовали объемную производительность забрасывателя типа ЗП-600, которая оценивалась по уровню твердого топлива в загрузочном бункере. Поверка приборов выполнена в условиях ОАО «Теплоэнергоавтоматика» (г. Донецк).

В ходе эксперимента осуществлялись непрерывные измерения температуры НТКС и производительности дутьевого вентилятора с их последующей ручной регистрацией, а также определение текущей производительности забрасывателя по уровню твердого топлива в бункере. Оценка показаний технологических датчиков осуществлялась каждые 30 с, что в соответствии с теоремой Котельникова о выборе интервала дискретизации сигнала [111] являлось достаточным для воспроизводимости результатов эксперимента.

Экспериментальные исследования выполнялись на функционирующем в нормальном режиме котельном агрегате. Ступенчатые управляющие воздействия производительностью котла НТКС осуществлялись в ручном режиме либо изменением производительности забрасывателя либо/и дутьевого вентилятора. При этом величина управляющего воздействия не должна была вывести температуру в топочном пространстве за пределы существования кипящего слоя.

Технические характеристики датчиков технологических параметров [83], структурная схема объекта исследований [132], условия проведения эксперимента, методика, программа и порядок обработки полученных данных приведены в методике оценки динамических свойств котлоагрегата (приложение Б).

С целью получения достоверной информации о динамических свойствах топки НТКС было осуществлено необходимое количество измерений [130] контролируемых параметров топки.

Номинальные значения технологических параметров котельной установки были следующие:

- температура наружного воздуха t_{vn} , °С	-8;
- начальная температура НТКС t_{ks} , °С	800;
- начальный объемный расход твердого топлива V_{tt} , м³/ч	0,29;
- изменение объемного расхода твердого топлива V_{tt} , м³/ч	+0,04;
- начальный объемный расход дутьевого воздуха V_{dv} , м³/с	1,0;
- коэффициент избытка дутьевого воздуха α	1,7;
- изменение объемного расхода дутьевого воздуха V_{dv} , м³/с	-0,2;
- низшая теплота сгорания твердого топлива Q_n^P , кДж/кг	16987;
- влажность твердого топлива W , %	4;
- зольность твердого топлива A , %	40.

В соответствии с рекомендациями по обработке результатов экспериментов [53], были определены усредненные значения коэффициентов, характеризующих динамические свойства объекта исследований. На основе компьютерного моделирования работы топки НТКС были получены графики переходных процессов в топке при условиях, подобных условиям проведения эксперимента.

Обработка результатов эксперимента и результаты компьютерного моделирования [59] для управления по производительности забрасывателя и по производительности дутьевого вентилятора приведены соответственно в таблицах В.1 и В.2. На рисунках 3.1 и 3.2 представлены экспериментальные характеристики изменения температуры НТКС при ступенчатом управлении по производительности забрасывателя и дутьевого вентилятора, соответственно, вместе с результатами компьютерного моделирования. Сдвиг по времени в 4000 с обусловлен необходимостью имитации математической моделью процесса розжига топки.

Дисперсии воспроизводимости и неадекватности экспериментальных

данных составили $\sigma_{y1}^2=89,68^{\circ}\text{C}$, $\sigma_{y2}^2=23,79^{\circ}\text{C}$, $\sigma_{n1}^2=37,00^{\circ}\text{C}$, $\sigma_{n2}^2=73,21^{\circ}\text{C}$.

Осуществим сравнение с табличным значением критерия Фишера

$$F_1 = \frac{\sigma_{n1}^2}{\sigma_{y1}^2} = 4,01 < 4,49; \quad F_2 = \frac{\sigma_{n2}^2}{\sigma_{y2}^2} = 3,08 < 4,49.$$

Следовательно, разработанная модель топки НТКС при уровне доверительной вероятности 0,95 адекватна реальным процессам в котлоагрегате.

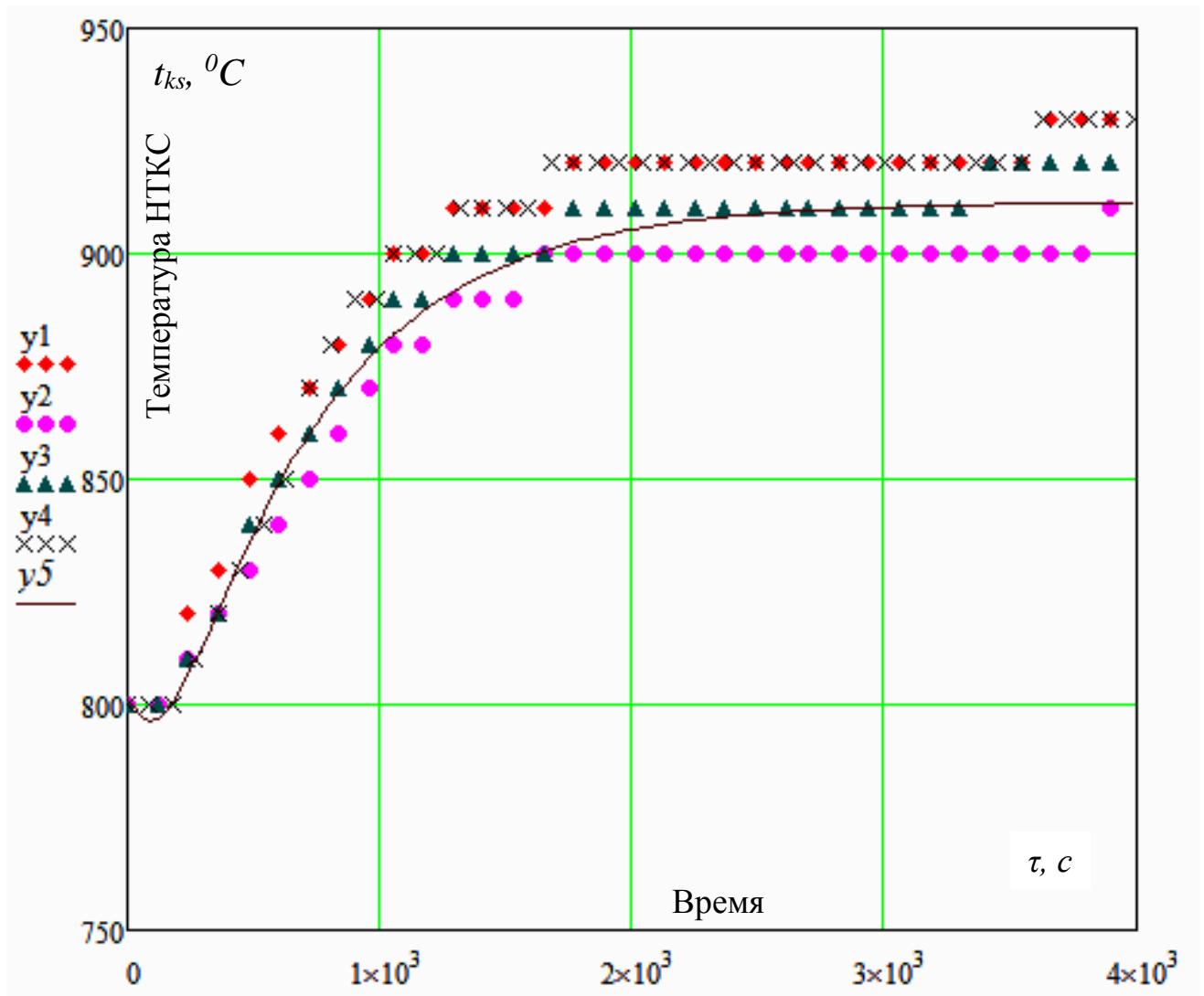


Рисунок 3.1 – Изменения температуры НТКС при ступенчатом воздействии по производительности забрасывателя (экспериментальные характеристики $y1 - y4$) и результатов моделирования (характеристика $y5$)

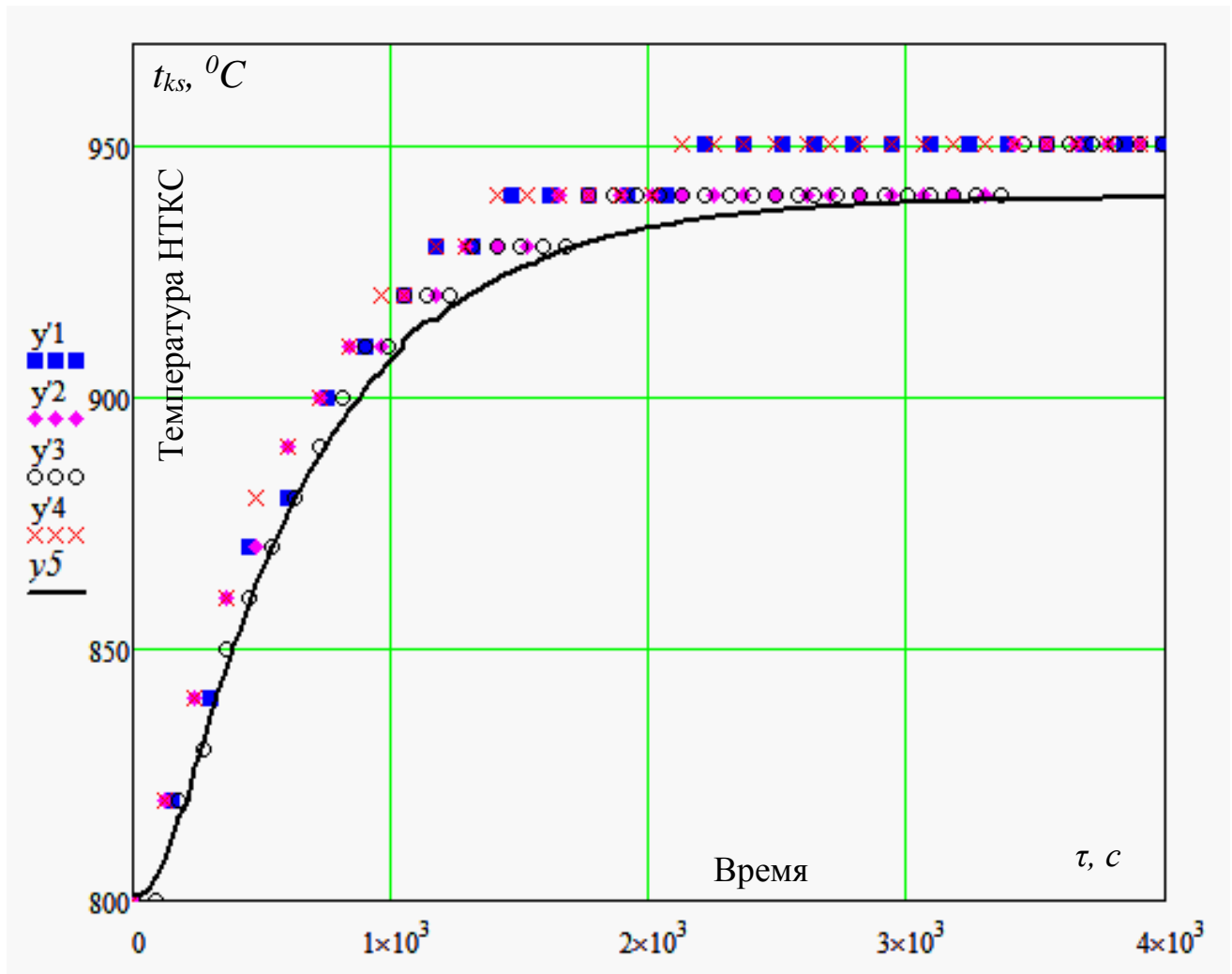


Рисунок 3.2 – Изменения температуры НТКС при ступенчатом воздействии по производительности дутьевого вентилятора (экспериментальные характеристики $y_1 - y_4$) и результатов моделирования (характеристика y_5)

3.2 Идентификация передаточных функций структурных звеньев котлоагрегата с НТКС по результатам эксперимента

Результаты исследований были использованы для идентификации динамических характеристик топки НТКС. При этом определялись параметры, которые невозможно непосредственно измерить используемыми средствами отбора информации.

Для идентификации передаточной функции по контуру « $V_{\text{т}}$ - $Q_{\text{т}}$ », с учетом необходимости оценки динамики объекта при всех возможных изменениях параметров твердого топлива, были выбраны характеристики угля:

- рабочие (используемые для проведения теплотехнических расчетов установки [118]) $A=40\%$, $W=6,5\%$, $d_{mo}=6\text{мм}$.

При моделировании предполагалось, что предварительный прогрев НТКС осуществлен до температуры $+700^{\circ}\text{C}$ за счет использования жидкого топлива.

Полученные в результате эксперимента (Рис.3.3, характеристика 1) и компьютерного моделирования на базе разработанной математической модели (Рис.3.3, характеристика 2) графики переходных процессов при ступенчатом изменении расхода твердого топлива V_{tt} приведены в одной системе координат для наглядной демонстрации сходимости результатов компьютерного моделирования с результатами натурного эксперимента.

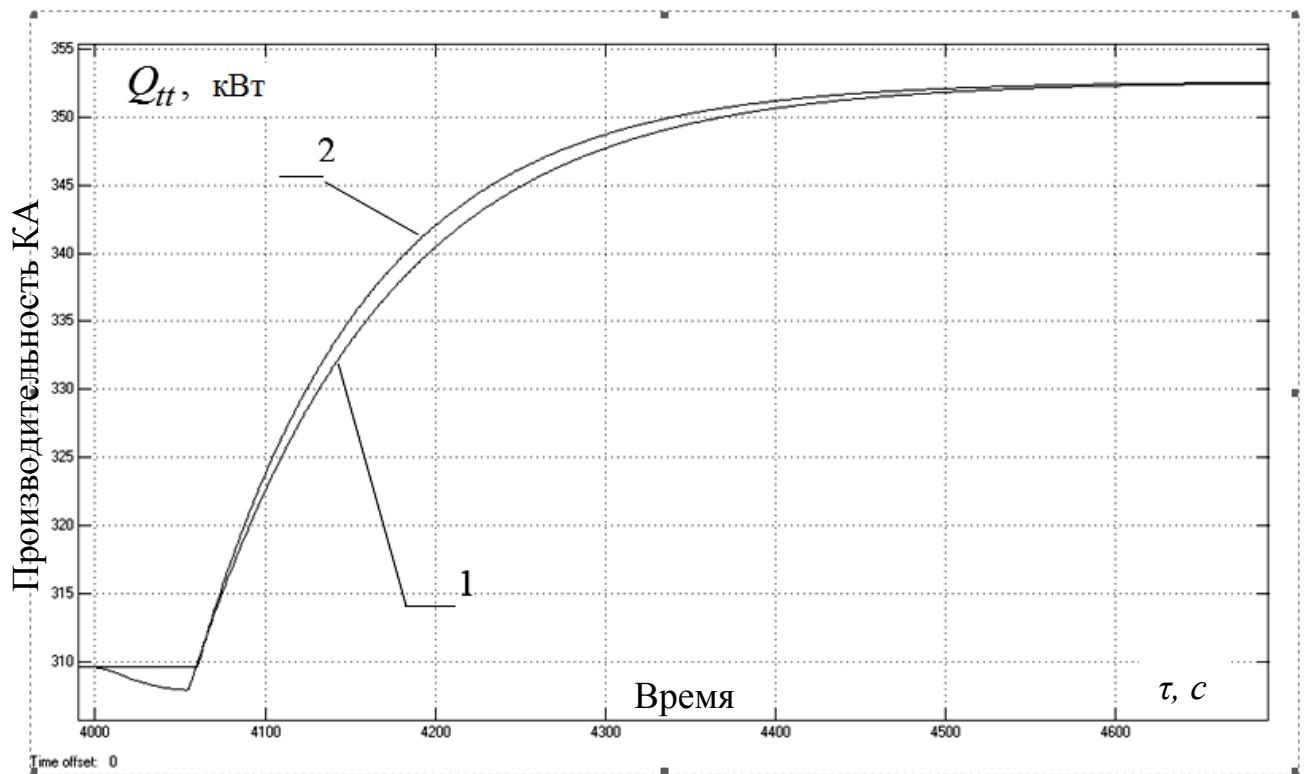


Рисунок 3.3 – Изменение Q_{tt} при ступенчатом воздействии V_{tt} , $A=40\%$, $W=6,5\%$, $d_{mo}=6$:

характеристика 1 – результат экспериментальных исследований;
характеристика 2 – результат компьютерных исследований на базе матмодели

Анализ характера реальных переходных процессов позволил сделать вывод о возможности представления передаточной функции по каналу « V_{tt} , - Q_{tt} » в виде

последовательного соединения звена транспортного запаздывания и апериодического звена первого порядка [25, 98] (Рис 3.3, характеристика 2)

$$W(p)_{v_{tt}-Q_{tt}} = \frac{K_{tt}}{p \cdot T_{tt} + 1} \cdot e^{-p\tau_{tt}}, \quad (3.1)$$

где K_{tt} – передаточный коэффициент, Дж/(м³·с);

T_{tt}, τ_{tt} – постоянные времени, с.

Для условий моделирования при рабочих характеристиках топлива передаточный коэффициент и постоянные времени в выражении 3.1 составили

$$K_{tt}^p = 16,2 \cdot 10^6 \text{ кДж/м}^3, T_{tt}^p = 100 \text{ с}, \tau_{tt}^p = 60 \text{ с}.$$

С учетом однозначной связи величин Q_{tt} , v_v и v_g [25, 98] передаточные функции по каналам каналу «расход твердого топлива – количество прореагировавшего воздуха» принимают вид

$$W_{v_{tt}-v_{pr.vz}}(p) = -\frac{\frac{K_{tt}}{Q_n^p} \cdot v_v}{T_{tt} \cdot p + 1} \cdot e^{-\tau_{tt} \cdot p}; \quad (3.2)$$

$$W_{v_{tt}-v_{p.sg}}(p) = -\frac{\frac{K_{tt}}{Q_n^p} \cdot v_d}{T_{tt} \cdot p + 1} \cdot e^{-\tau_{tt} \cdot p}. \quad (3.3)$$

Учитывая значительную инерционность тепловых процессов по сравнению со временем пребывания в топочном пространстве газообразных реагентов (секунды или даже доли секунд [73]) передаточные функции по каналам «количество теплоты Q_{tt} , отбираемое из слоя – расход дутьевого воздуха V_{dv} » можно представить в виде безынерционного звена

$$W_{dv-Q_{tt}}(p) = -K_{VT}. \quad (3.4)$$

Для условий исследования значение передаточного коэффициента составило $K_{vt} = 980 \text{ кДж/м}^3$.

Для определения передаточной функции $W_{Q_{tt}-t_{ks}}(p)$ по каналу «изменение аккумулированной НТКС теплоты Q_{tt} – температура НТКС t_{ks} » имитация ступенчатого воздействия по количеству теплоты в модели осуществлена изменением производительности дутьевого вентилятора ввиду наличия транспортного запаздывания и инерционности системы при воздействии по топливу (формула 3.5).

Результаты моделирования (характеристика 1) и аппроксимации передаточной функции $W_{Q_{tt}-t_{ks}}(p)$ в виде аperiodического звена первого порядка (характеристика 2) представлены на рисунке 3.4.

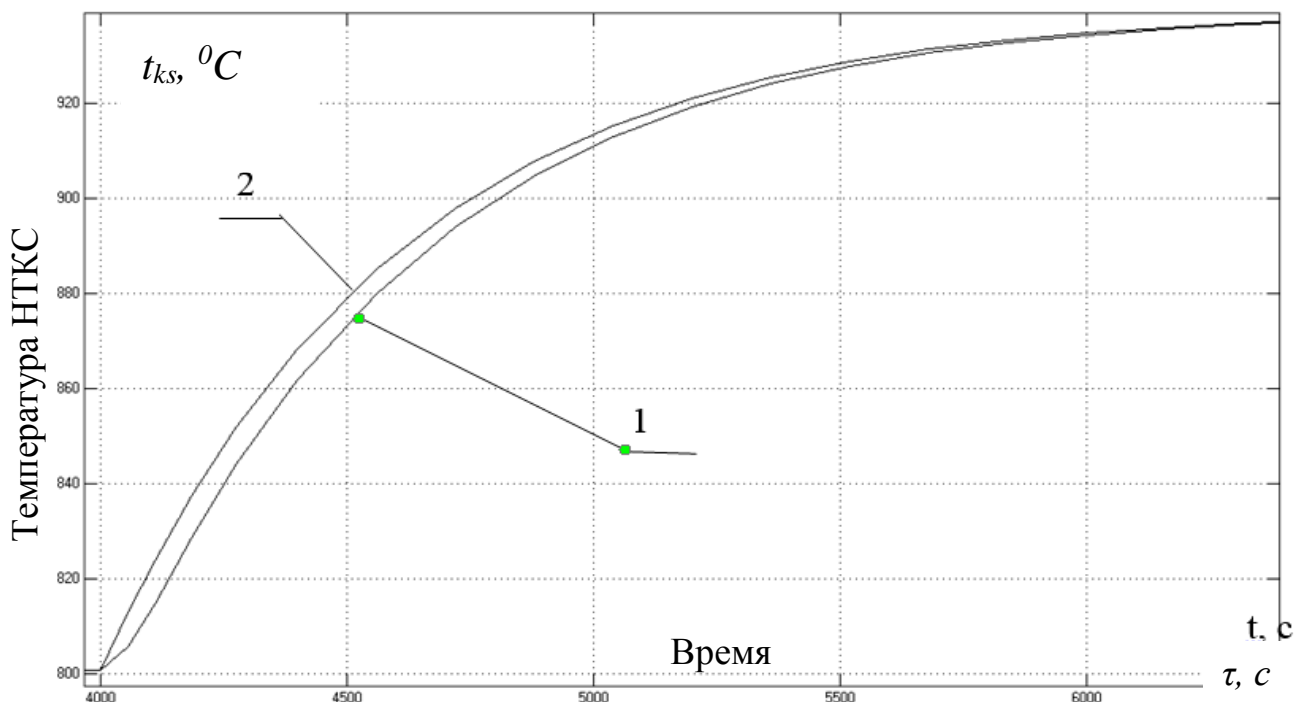


Рисунок 3.4 – Зависимость t_{ks} при ступенчатом изменении поступления теплоты в слой:

характеристика 1 – результат экспериментальных исследований;
характеристика 2 – результат исследований с помощью матмодели

В соответствии с выбранной методикой аппроксимации [25] передаточная функция имеет вид:

$$W_{Q_{tt}-t_{ks}}(p) = \frac{K_{sl}}{T_{sl} \cdot p + 1}, \quad (3.5)$$

где коэффициент K_{sl} составил $0,1^{\circ}\text{C}/\text{кДж}$ при постоянной времени (время, которое определяет инерционность объекта) $T_{sl} = 610$ с.

С учетом возможных в процессе эксплуатации КА колебаний массы КС для последующего синтеза системы управления принято допущение о возможности изменения величин K_{sl} и T_{sl} в пределах $\pm 10\%$ от расчетного [64, 108].

3.3 Выводы по третьей главе

1. Была разработана методика проведения эксперимента и проведены натурные испытания для исследования динамических характеристик изменения температуры слоя топки НТКС при управляющих воздействиях по расходу твердого топлива и скорости дутьевого воздуха. Обработка результатов экспериментов выполнялась в соответствии со стандартной методикой.

2. На основании графиков переходных процессов в топке, построенных по экспериментальным данным, осуществлена идентификация топки НТКС как объекта управления и получены передаточные функции изменения производительности топки по каналам управления расходом твердого топлива и скоростью дутьевого воздуха. Рассчитанные передаточные функции использованы при построении модели производства и распределения теплоты в КА с НТКС.

3. Проведенные результаты сравнения графиков переходных процессов в топке, полученных по экспериментальным данным, и полученных, на основе компьютерного моделирования с использованием разработанной матмодели, доказывают ее адекватность, что подтверждено критерием Фишера.

ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАСЧЕТА РАЦИОНАЛЬНОГО СОСТАВА И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ГРУППЫ КОТЛОАГРЕГАТОВ С НТКС

4.1 Обоснование критериев рациональной работы группы котлоагрегатов с НТКС

Для осуществления оперативного регулирования производительности шахтной котельной необходимо своевременно прогнозировать изменения теплового спроса шахтных абонентов по градиенту изменения температуры окружающей среды и пользоваться при этом не только суточным прогнозом температуры, но и фактическими показаниями средств измерения температуры наружного воздуха, используемых для мониторинга системы теплоснабжения шахты [34, 35, 129]. Целесообразно принять прогноз в временной перспективе до 2-х часов, что обеспечивает двойной запас по времени для розжига топки НТКС при необходимости увеличить суммарную производительность котлоагрегатов. Для прогноза теплового спроса необходимо в автоматическом режиме рассчитывать для каждого j -го абонента часовые расходы тепловой энергии на отопление, вентиляцию, горячее водоснабжение и калориферную установку, соответственно по формуле (1.7). Тогда суммарное задание для котельной установки на выработку теплоты в заданной временной перспективе $\Delta\tau_{ust}$ (где $\Delta\tau_{ust}$ - промежуток времени от момента выдачи задания, до момента времени, когда абонентский спрос станет равным данному заданию) определим как

$$Q_{ust} = \sum_{i=1}^m (Q_{k.a.i} \cdot \eta_{k.a.i}) = \sum_{j=1}^n (Q_{ot.j} + Q_{vent.j}) + Q_{kal} + Q_{g.vsn} + \sum_{j=1}^n Q_{pot.tr.j}. \quad (4.1)$$

Сформулируем целевую функцию критерия максимума КПД. Коэффициент полезного действия группы котлоагрегатов m определим как средневзвешенную величину КПД всех агрегатов

$$\eta(\{Q_{k.a.i}\}) = \frac{\sum_{i=1}^m \eta_{k.a.i} Q_{k.a.i}}{\sum_{i=1}^m Q_{k.a.i}} \rightarrow \max, \quad (4.2)$$

где $\{Q_{k.a.i}\} = \{Q_{k.a.1}, Q_{k.a.2}, \dots, Q_{k.a.m}\}$ - вектор производительности всех m агрегатов, Вт;

$\eta_{k.a.i}(G_{k.a.i})$ - КПД i -го агрегата (независимо от используемого топлива), %;

$Q_{k.a.i}$ - полная теплопроизводительность i -го агрегата, Вт.

Теплопроизводительность в (4.2) определяется на основе количества производимого теплоносителя следующим соотношением [68]

$$Q_{k.a.i} = \frac{Q_{pol.i}}{\eta_{k.a.i}} = \frac{G_{k.a.i} c_v (t_v^n - t_v^0)}{\eta_{k.a.i}} = \frac{G_{k.a.i} (I_v^n - I_v^o)}{\eta_{k.a.i}}, \quad (4.3)$$

где $G_{k.a.i}$ - водопроизводительность каждого i -го агрегата, кг/с;

I_v^n и I_v^o - энтальпии нагретой воды и питательной воды, Дж/кг.

Энтальпии нагретой и питательной воды определяются по таблицам теплофизических свойств воды и водяного пара в зависимости от давления и температуры воды. Последние определяются по тепловому расчету и для обеспечения на выходе заданных параметров теплоносителя в процессе работы котлоагрегатов поддерживаются на необходимом уровне.

При определении рационального состава котлоагрегатов необходимо учитывать их текущее состояние (в работе, в «горячем» резерве, потушен), поскольку вывод котлов в рабочее состояние сопровождается дополнительными материальными затратами на розжиг топки, а также временными затратами на выход из «горячего резерва» и розжиг. Таким образом, вводятся дополнительные ограничения по минимуму расхода условного топлива

$$B^{usl}(\{Q_{k.a.i}\}) = \sum_{i=1}^m B_i^{usl}(Q_{k.a.i}) = \sum_{i=1}^m E \cdot B_i(Q_{k.a.i}) \rightarrow \min, \quad (4.4)$$

где $B_i^{usl}(Q_{k.a.i})$ – расход условного топлива, необходимый для выхода на требуемую производительность i -го котлоагрегата, кг/с;

$B_i(Q_{k.a.i})$ – суммарный расход натурального топлива (жидкого на розжиг и твердого топлива), кг/с;

E – топливный эквивалент, показывает, какому количеству условного топлива равноценна единица массы (или объема) того или иного вида натурального топлива.

Топливный эквивалент в выражении (4.4) находится как отношение низшей теплоты сгорания Q_n^p данного топлива к теплоте сгорания условного топлива

$$E = \frac{Q_n^p}{29,3}.$$

По временным затратам:

$$\Delta\tau_{pp.i} \rightarrow \Delta\tau_{ust} \pm \Delta\tau_{pogr}^{dop} = 2ч \pm \Delta\tau_{pogr}^{dop}. \quad (4.5)$$

Физический смысл ограничения по времени заключается в том, что время переходного процесса $\Delta\tau_{pp}$ каждого i -го котлоагрегата, от исходного состояния котла (в работе, в «горячем» резерве, отключен) до момента, когда будет достигнуто условие (4.1), должно соответствовать времени $\Delta\tau_{ust}$ (по технологическим причинам принимаем $\Delta\tau_{ust} = 2$ ч), когда фактический тепловой спрос достигнет значения, определенного в задании с учетом погрешности $\Delta\tau_{pogr}^{dop}$.

При постановке задачи учетом ограничения на суммарную производительность котлоагрегатов

$$\sum_{i=1}^m (Q_{k.a.i} \cdot \eta_{k.a.i}) \geq Q_{ust}. \quad (4.6)$$

и диапазоны рабочей производительности для каждого котла

$$Q_{k.a.i}^{\min} \leq Q_{k.a.i} \leq Q_{k.a.i}^{\max}, i = 1 \dots m. \quad (4.7)$$

Таким образом, сформулированная задача рационализации режимов работы котлоагрегатов по критерию (4.2) при совокупности ограничений (4.4) - (4.7). В процессе определения рационального режима работы котельной установки необходимо определить $(m-1)$ переменных: $Q_{k.a.i}$, где $i=1, \dots, (m-1)$.

Значения $Q_{k.a.m}$, определяются из следующего соотношения

$$Q_{k.a.m} = Q_{ust} - \sum_{i=1}^{m-1} Q_{k.a.i}. \quad (4.8)$$

Проиллюстрируем графически задачу поиска рационального состава котлоагрегатов с НТКС по критерию (4.2).

На рисунке 4.1 представлена зона рациональной работы совокупности котлоагрегатов с НТКС. Как видно на графике зависимости КПД котлоагрегата $\eta_{k.a.} = f(Q_{pol.i}, m)$ от его производительности и количества работающих агрегатов существует зона рациональной работы котлоагрегатов при КПД не ниже, чем обозначенный нижний уровень

$$\eta_{k.a.} \geq \eta_{min}. \quad (4.9)$$

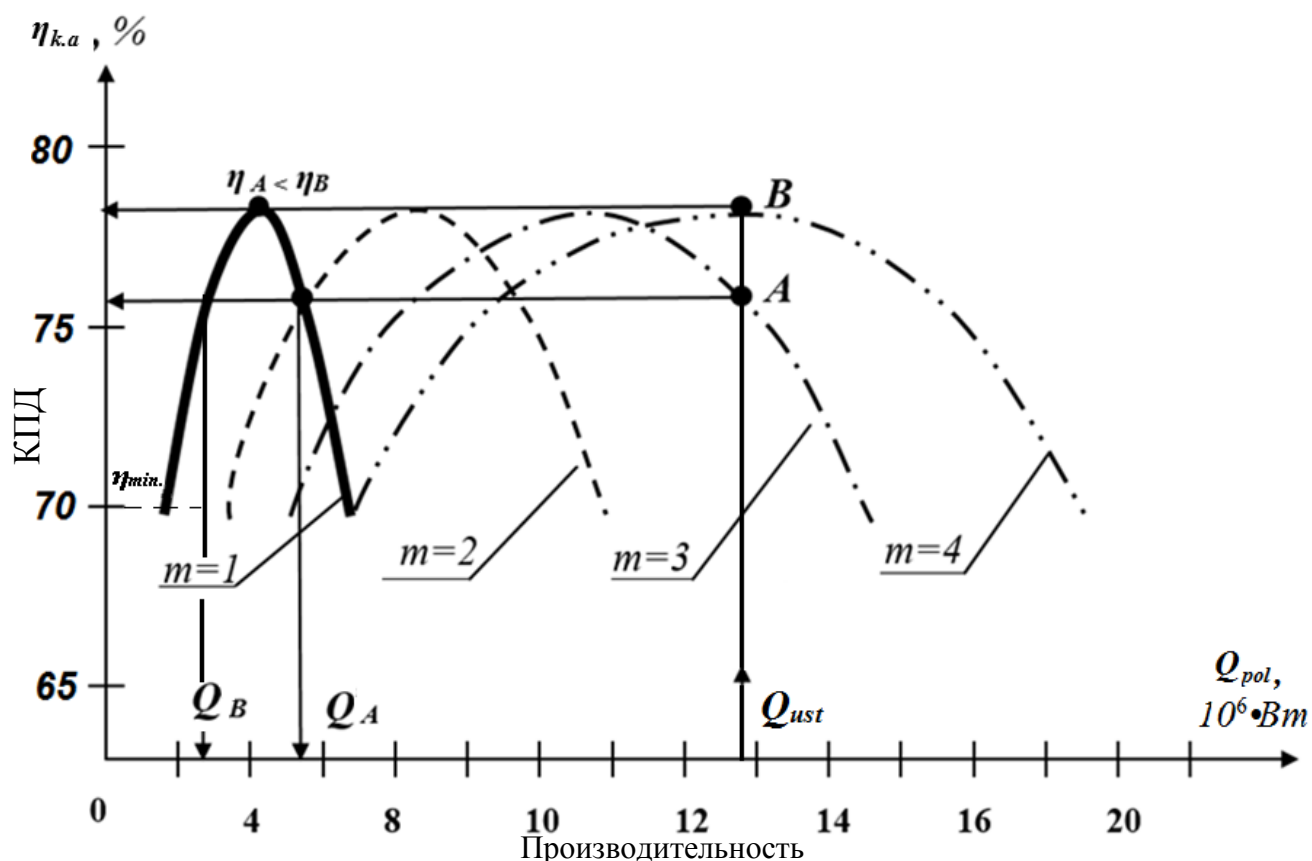


Рисунок 4.1 – Обобщенная зависимость КПД группы котельных агрегатов от полезной производительности $\eta_{k.a.} = f(Q_{pol.i.}, m)$

Согласно [79] в качестве нижней границы значений КПД целесообразно принять 70%. При построении зависимостей принято максимальное количество работающих котлоагрегатов $m = 4$, для упрощения предполагалось, что котлоагрегаты однотипные и находятся в одинаковом техническом состоянии, что приводит к идентичному виду зависимостей $Q_{pol} = f(\eta_{k.a.})$ для всех, и на момент поиска решения все котлы находятся во включенном состоянии.

Как видим, необходимую производительность Q_{ust} можно получить при работе как трех, так и четырех котлоагрегатов. На рабочих характеристиках режимов общей работы котлоагрегатов это точки А и В, соответственно.

Поскольку данным точкам соответствует различные КПД работы топок, то более рациональным следует считать режим В одновременной работы четырех котлоагрегатов, поскольку КПД установок при этом выше $\eta_A < \eta_B$, как следует из

графика. При этом необходимо заметить, что топки в режиме В будут работать с меньшей производительностью каждая Q_B , чем работали бы при работе трех котлоагрегатов $Q_B < Q_A$.

Поскольку котлоагрегаты на практике обычно имеют разный вид характеристики зависимостей производительности от КПД, то данных кривых на графике может быть m^m , которые будут описывать все комбинации совместной работы котлоагрегатов.

Из-за различного вида характеристик $\eta_{k.a.} = f(Q_{pol})$ также осложняется задача поиска производительности каждой топки, ведь в данном случае рациональный КПД и рациональная производительность каждой топки не будут совпадать.

Эта проблема решается путем разработки метода определения рациональной производительности совокупности котлоагрегатов с НТКС.

Для каждого котлогарегата зависимость $\eta_{k.a.} = f(Q_{pol})$ не является стационарной и меняется в определенном диапазоне в зависимости от комбинации значений технологических параметров: температуры НТКС, расхода твердого топлива, скорости дутьевого воздуха, степени погружения погружных поверхностей нагрева.

4.2 Определение вида зависимости производительности котлоагрегата от его КПД методом теплового баланса

Запишем уравнение теплового баланса котлоагрегата с НТКС [112] в общем виде из расчета на 1 кг внесенного в топку угля

$$Q_p^p = Q_{rash}. \quad (4.10)$$

Теплота, поступающая в топку Q_p^p , определяется как [8]

$$Q_p^p = Q_n^p + Q_{dv}^p + Q_{ft}^p, \quad (4.11)$$

где Q_n^P – низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг;

Q_{ft}^P – теплота, внесенная в топку с физической теплотой топлива, Дж/кг.

Поскольку предварительный прогрев топлива отсутствует, то ввиду малого значения по сравнению с другими составляющими данным слагаемым можно пренебречь;

Q_{dv}^P – теплота, внесенная в топку с дутьевым воздухом, Дж/кг. Количество теплоты на единицу массы – Q_{dv}^P , внесенное в топку дутьевым воздухом определяется как:

$$Q_{dv}^P = I_{dv} \cdot \nu\nu \cdot \alpha \cdot \frac{273}{273 + t_{dv}}, \quad (4.12)$$

где t_{dv} – температура дутьевого воздуха, °С;

I_{dv} – удельная энтальпия дутьевого воздуха, Дж/кг;

$\nu\nu$ – теоретический объем сухого воздуха, необходимый для полного сгорания 1 кг топлива, м³/кг; $\nu\nu = 10,42$ м³/кг [119, 120];

α – коэффициент избытка дутьевого воздуха, $\alpha \geq 1,25$ [120].

Температура дутьевого воздуха t_{dv} равняется температуре окружающей среды t_{vn} без использования воздухоподогревателя и значительно превышает ее при использовании последнего.

Расходная часть теплового баланса непосредственно самого слоя без учета дальнейшего теплообмена поверхностей нагрева котлоагрегата с НТКС и уходящими газами, преобразуется из выражения (2.9) и представляет собой:

$$Q_{rash} = Q_{h.n.} + Q_{f.n.} + Q_{f.sh} + Q_{oh} + Q'_{p.sg} + Q'_{is.vz} + Q_{ppn}^{ks}; \quad (4.13)$$

где $Q_{h.n.}$ – потери теплоты от химического недожога, Дж/кг;

$Q_{f.n.}$ – потери теплоты от физического недожога, Дж/кг. Поскольку для НТКС применяется система возврата уноса принимаем $Q_{h.n.} = 0$ [111];

$Q_{f.sh}$ – потери теплоты с физической теплотой шлаков, Дж/кг. Поскольку для НТКС применяется система самоудаления шлака, путем его провала под дутьевую решетку, а удаляемый шлак имеет температуру практически окружающей среды, то данным составляющим энергетического баланса можно пренебречь и принять $Q_{f.sh} = 0$;

Q_{oh} – потери теплоты от внешнего охлаждения и нагрева циркуляционных поверхностей котлоагрегата, Дж/кг;

$Q'_{p.sg}$ – теплота, уносимая из слоя с продуктами сгорания до теплообмена с поверхностями нагрева, Дж/кг;

$Q'_{is.vz}$ – теплота, уносимая из слоя с исходящим воздухом до теплообмена с поверхностями нагрева, Дж/кг;

Q_{ppn}^{ks} – теплота, воспринимаемая ППН от слоя, Дж/кг.

Необходимо отметить, что теплота, уносимая из слоя с продуктами сгорания и непрореагировавшим воздухом (уходящими дымовыми газами: $Q'_{p.sg} + Q'_{is.vz} = Q'_{ug}$), частично полезно тратится на нагрев воды в поверхностях нагрева – $Q_{pn}^{ug} = Q_{ppn}^{ug} + Q_{epn} + Q_{kpn} + Q_{ek}$, а частично теряется в атмосферу вместе с уходящими газами – $Q_{atm} = Q_{p.sg} + Q_{is.vz}$

$$Q'_{ug} = Q'_{p.sg} + Q'_{is.vz} = Q_{pn}^{ug} + Q_{atm}. \quad (4.14)$$

Однако, с возрастанием температуры уходящих газов и увеличением коэффициента избытка воздуха возрастает как интенсивность теплообмена с поверхностями нагрева, так и потери теплоты в атмосферу. Наиболее точно данные потери определяются по результатам испытаний котлоагрегата.

Потери теплоты в окружающую среду связаны с наружным охлаждением элементов котлоагрегата и зависят от размеров, толщины и качества обмуровки, степени экранирования топки, наличия хвостовых поверхностей нагрева. Доля потерь теплоты в окружающую среду, отнесенная к 1 кг сжигаемого топлива, для котлов малой производительности:

$$Q_{oh} = \frac{Q_F \cdot F_{oh} + Q_{tp.k}}{V_n}, \quad (4.15)$$

где Q_F – удельная потеря теплоты с поверхности охлаждения, Дж/(м²·с);

F_{oh} – поверхность охлаждения по наружному обмеру, м²;

$Q_{tp.k}$ – потеря теплоты трубопровода котла, Дж/с;

Данная величина определяется для двух вариантов – с установкой и без установки экономайзера. Значение потерь теплоты в окружающую среду в процентах для водогрейных котлов q_{oh} принимается в соответствии с графиком зависимости потери теплоты в окружающую среду от производительности котлоагрегата, а также от наличия или отсутствия экономайзера [120].

Значение потерь теплоты от химической неполноты сгорания $Q_{h.n.}$ принимаются в зависимости от вида топлива и метода сжигания, согласно характеристикам топочных устройств. Для топок НТКС данная величина в процентах может быть принята как постоянная $q_{h.n.} = 1,4\%$.

Таким образом, исходя из вышеизложенного для установившегося состояния котлоагрегата, учитывая выражение (2.10)

$$Q_n^p = Q_{h.n.} + Q_{oh} + Q_{atm} + Q_{pol}; \quad (4.16)$$

Если принять Q_n^p за 100%, то из выражения (4.13) в процентах получим [112]

$$100 = q_{pol} + q_{atm} + q_{h.n.} + q_{oh} = q_{pol} + \Sigma q_{pot}, \quad (4.17)$$

где $q_{pol} = \eta_{k.a.} = \frac{Q_{pol}}{Q_n^p} \cdot 100\%; \quad q_{h.n.} = \frac{Q_{h.n.}}{Q_n^p} \cdot 100\% \text{ и т. д.}$

Или с другой стороны

$$\eta_{\delta p} = q_{pol} = 100 - \Sigma q_{pot}. \quad (4.18)$$

Для определения КПД котлоагрегата применяются методы прямого и обратного балансов. В первом случае необходимо измерять параметры и количество воды, количество, температуру и состав топлива, а также температуру и состав уходящих газов. Подобные измерения трудоемки и содержат значительную погрешность измерения. Определение КПД по методу обратного баланса основано на измерении только величин, характеризующих потери теплоты с уходящими газами и из-за химической неполноты сгорания топлива, по данным измерения температуры и состава уходящих газов.

Определение КПД по обратному балансу считается более достоверным и рекомендуется при обработке данных испытаний котлов. Этот метод исключает ошибки, связанные с определением количества и теплоты сгорания топлива, требует меньшего числа измерений, и позволяет более точно выявить условия сжигания топлива.

В простейшем случае теплота, полезно затраченная на выработку нагретой воды на каждый кг топлива (угля) составляет [120]

$$Q_{pol} = \frac{Gc_v(t_v^n - t_v^o)}{m_{ugol}}, \quad (4.19)$$

где G – расход воды в системе, кг/с;

c_v – теплоемкость воды, Дж/(кг·°C);

t_v^n – температура нагретой воды, которая поступает потребителям, °C;

t_v^o – температура холодной воды на входе в циркуляционную систему котла (обратного трубопровода), °C;

m_{ugol} – масса угля, вносимого в слой в единицу времени, кг/с;

В таком случае коэффициент полезного действия котлоагрегата составляет:

$$q_{pol} = \eta_{k.a.} = \frac{Gc_v(t_v^n - t_v^o)}{m_{ugol} \cdot Q_n^p} \cdot 100\%. \quad (4.20)$$

Зная КПД производительности топки можно определить необходимую тепловую мощность, с которой она должна работать, чтобы обеспечить требуемое количество теплоносителя

$$Q_{k.a.} = \frac{G(I_{\cdot v}^n - I_v'^o)}{\eta_{k.a.}} 100\% = \frac{Q_{pol}}{\eta_{k.a.}}. \quad (4.21)$$

Расход топлива, необходимый для обеспечения требуемой производительности котлоагрегата определяем по формуле

$$B = \frac{Q_{pol}}{Q_n^p \cdot \eta_{k.a.}} = \frac{Q_{k.a.}}{Q_n^p}, \quad (4.22)$$

где B – количество потребляемого топлива, кг/с, необходимого для обеспечения тепловой нагрузки $Q_{k.a.}$, Вт;

Q_n^p – удельная теплота сгорания топлива, Дж/кг;

$\eta_{k.a.}$ - КПД котла, %.

Полученные выражения представляют из себя базовое математическое описание производства и распределения теплоты в котлоагрегатах с НТКС и используются для определения вида характеристики $Q_{pol} = f(\eta_{k.a.})$ каждого котлоагрегата.

4.3 Разработка метода расчета рационального состава группы котлоагрегатов с НТКС и производительности каждого котла

Отметим, что важной проблемой при исследовании и прогнозировании поведения котлоагрегатов путем моделирования их работы является относительно быстрая смена их состояний и характеристик в процессе эксплуатации. В то же

время испытания, в ходе которых определяются необходимые величины, являются трудоемкими и дорогими.

Решение этой проблемы следует осуществлять в два этапа. Периодически, относительно редко следует проводить испытания, в которых определяются базовые характеристики: температура уходящих газов, температура шлаков, температура наружных ограждений, температура элементов циркуляционной системы котлоагрегата и коэффициента избытка воздуха в зависимости от изменений производительности котлоагрегатов, по которым определяются потери теплоты. Данные зависимости принимаются в качестве нормативных, и они являются исходными при определении вида зависимости КПД выражение (4.20).

Далее в процессе эксплуатации указанные параметры измеряются при текущей нагрузке, определяется их отклонение от нормативных величин и, исходя из этого, делается исправление их значений во всем диапазоне рабочих нагрузок. При эксплуатации также измеряются и другие, указанные выше характеристики. Это дает возможность путем периодической корректировки модели добиваться максимально возможного ее соответствия реальному объекту (котлоагрегату).

Исходными данными для расчета являются:

- вектор текущих параметров каждого котлоагрегата с НТКС, а именно – состояние, производительность, и др. технологические параметры;
- совокупность векторов значений технологических параметров каждого котлоагрегата с НТКС, а именно, производительности i -го котла с НТКС, соответствующих этой производительности расхода твердого топлива, расхода дутьевого воздуха, степени погружения в слой ППН, а также КПД i -го котла при данных параметрах, т.е. множество точек, характеризуемых соответствующими координатами $[Q_{k.a.i.}; B_{tt.i.}; v_{dv.i.}; k_{ksi.}; \eta_{k.a.i.}]$. Поскольку одинаковое значение производительности котла с НТКС можно получить при различных комбинациях значений управляющих величин, то целесообразно при выборе режима работы котлоагрегата останавливаться на той комбинации, которой соответствует максимальный для данного значения производительности КПД и рекомендовать ее к промышленному использованию;

- зависимости КПД каждой котельной установки от ее производительности в виде регрессионных полиномов третьей степени, определенные по результатам расчетов предыдущего пункта. При вычислении в явном виде зависимостей $\eta_{k.a.i} = f(Q_{k.a.i})$ необходимо опираться на теплотехнические показатели, полученные при режимно-наладочных испытаниях каждого котла, а также энергетические характеристики используемого топлива, его рыночную стоимость и др. Данные величины применяются для параметрической идентификации матмодели котлоагрегата НТКС, которая лежит в основе расчета.

При определении рациональных режимов работы и количества работающих котлоагрегатов будет использоваться математическую модель котлоагрегата с НТКС, представленную в п.2.2.

Учитывая разнокачественный характер неопределенностей в описании исходных данных для математической формализации неопределенности, целесообразно избрать методы нечетко-интервальной математики.

Зависимости КПД $\eta_{k.a.}$ и расходов твердого топлива $B_{т}$ от производительности топок целесообразно представить [54] в виде регрессионных полиномов 3-ей степени типа выражение (4.23), полученных в результате статистической обработки данных испытаний.

Исходными данными для расчета является тепловая суммарная производительность котлоагрегатов $Q_{пов}$ которая является заданной величиной, определенной САУ верхнего уровня в зависимости от параметров окружающей среды, потребителей теплоснабжения, которую получаем в результате расчетов, приведенных в приложении Г.

Листинг прогнозного расчета теплопотребления шахтными зданиями и сооружениями, а также калорифером в течение одних суток на примере шахты «Южнодонбасская № 1» (г. Угледар) в среде MathCad [72] приведено в приложении Г.

Методами регрессионного анализа были установлены функциональные зависимости КПД от текущей производительности котлоагрегатов.

Согласно [54] по критерию остаточной дисперсии наиболее удовлетворительным видом функциональных зависимостей является регрессионные полиномы третьей степени

$$f_i(Q_{pol.i}) = a_0^i + a_1^i \cdot Q_{pol.i} + a_2^i \cdot Q_{pol.i}^2 + a_3^i \cdot Q_{pol.i}^3 \quad (4.23)$$

Важной проблемой при практической реализации описанной методики поиска рационального режима работы котлоагрегатов является выбор рационального состава котлоагрегатов. Необходимо учитывать, что производительность некоторых котлов, в зависимости от требуемой суммарной тепловой нагрузки источников теплоты, могут быть равными нулю ($Q_{k.a.i} = 0$). Последнее означает, что возможны ситуации, когда для улучшения целевой функции по m работающим в данный момент котлов целесообразно остановить один (или несколько) из них.

Представим последовательность расчетов рациональных параметров группы котлов с НТКС в виде алгоритма (Рис.4.2).

В соответствии с ним сначала формируется m векторов значений исходных данных $\{X\}_i^d$, $i=1 \dots m$ по каждому котлу в группе, в том числе и о его состоянии – в работе (1), отключен (0), в «горячем» резерве (2). Размерность вектора d определяется структурой применяемой матмодели (количеством технологических параметров, учитываемых при расчете полей значений $Q_{k.a.}$).

Следующим этапом происходит перебор всех возможных вариантов (текущий вектор $\{x\}$) комбинаций технологических параметров для каждой из возможных комбинаций m^3 котлоагрегатов с учетом их состояния.

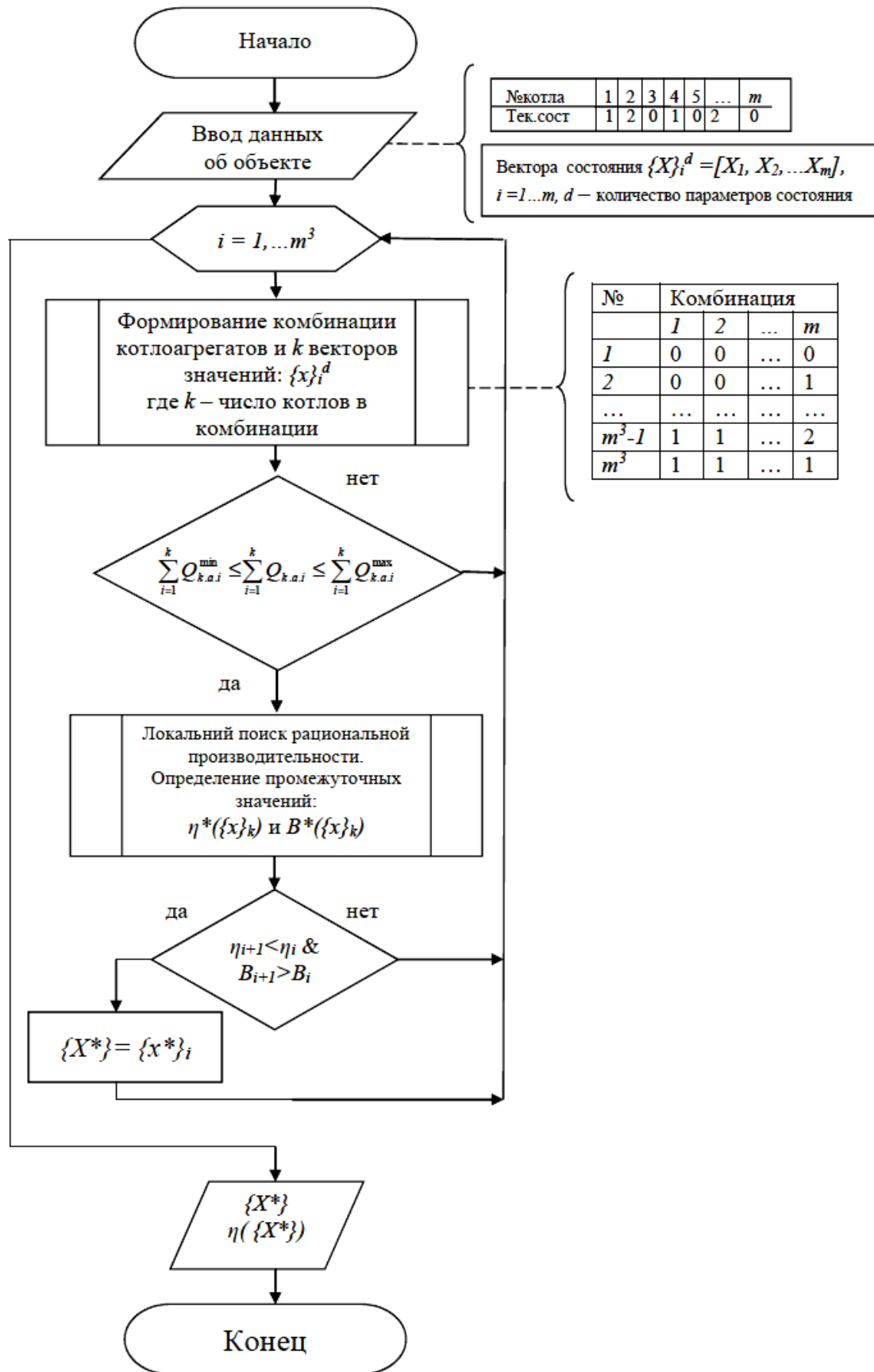


Рисунок 4.2 – Обобщенный алгоритм поиска рационального состава и производительности группы котлоагрегатов с НТКС

Затем проверяется, может ли текущий вариант обеспечить выполнение рассчитанной суммарной производительности

$$\sum_{i=1}^k Q_{k.a.i}^{\min} \leq \sum_{i=1}^k Q_{k.a.i} \leq \sum_{i=1}^k Q_{k.a.i}^{\max}, \quad (4.24)$$

где k – количество работающих котлов в данной комбинации.

При выполнении условия (4.24) для данной комбинации осуществляется подпрограмма вычисления средневзвешенного КПД группы котлов, а также расчет материальных затрат для перехода из исходного состояния к рассматриваемому варианту по критериям (4.4) и (4.5).

Далее осуществляется поиск рационального состава и производительности котлоагрегатов НТКС, основанный на применении численного метода «прямые выборочные процедуры с уменьшением интервала поиска» [54]. В течение поиска вектору искомых значений параметров присваиваются промежуточные значения при соблюдении условий $\eta_{i+1} > \eta_i$ и $B_{i+1} < B_i$. Результатами вычислений являются значения максимально возможного средневзвешенного КПД группы котлоагрегатов и минимально возможного расхода условного топлива для достижения задания по производительности, а также вектор соответствующих технологических параметров каждого котла с НТКС.

Метод случайного поиска «прямые выборочные процедуры с уменьшением интервала поиска», который является [54] наиболее эффективным для решения многоэкстремальных задач, поскольку он не связан с использованием производной, в связи с чем снимается требование гладкости (непрерывности и дифференцируемости) функции.

Дадим характеристику данному методу.

Исходными данными для решения данной задачи является:

- минимизируемая или максимизируемая функция f от m переменных:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n); \quad (4.25)$$

- допустимые границы варьирования переменных x_i :

$$\underline{x}_i < x_i < \overline{x}_i, i = 1..n; \quad (4.26)$$

- функциональные ограничения:

$$g_j(x_1, \dots, x_n) < b_j, j = 1..c, \quad (4.27)$$

где c - количество функциональных ограничений.

Поиск рационального решения осуществляется в Q сериях по P итераций в каждой серии. Количество итераций в серии P определяется в результате исследования конкретной модели в зависимости от ее сложности (количества переменных, ширины их диапазонов варьирования).

Количество серий Q определяется из соображений точности, что накладывается на искомые параметры

$$(1 - \varepsilon)^Q \leq \frac{eps}{\max_{i=1..n} (z_i)}; \quad (4.28)$$

где eps – точность вычислений;

ε – параметр, определяющий уменьшение интервала поиска (обычно $\varepsilon=0,05$);

z_i – диапазон варьирования неизвестных x_i : $z_i = \overline{x}_i - \underline{x}_i, i = 1 \dots n$.

В результате математических преобразований выражение для Q представляется в явной форме

$$Q \ln(1 - \varepsilon) \leq \ln \left(\frac{eps}{\max (z_i)} \right);$$

$$Q = \frac{\ln(\text{eps} / \max(z_i))}{\ln(1 - \varepsilon)}. \quad (4.29)$$

Опишем этапы реализации алгоритма поиска оптимального решения:

1. Определяется первоначальное решение. Его получаем как середины варьируемых диапазонов для каждой переменной

$$x_i^0 = \frac{x_i + \bar{x}_i}{2}, i = 1 \dots m. \quad (4.30)$$

В расчетах вектор рациональных значений $\{x^*\}$ и вектор промежуточного состояния $\{x^q\}$ полагаются равными вектора начальных решений $\{x^0\}$

$$\{x^*\} = \{x^q\} = \{x^0\}. \quad (4.31)$$

2. Вычисляется случайная точка X

$$x_i = x_i^q + r z_i, i = 1 \dots n, \quad (4.32)$$

где r – случайная величина, равномерно распределенная на интервале $(-0.5, 0.5)$.

3. Выполняется проверка на допустимость.

Если $x_i < \underline{x}_i$, принимаем $x_i = \underline{x}_i$.

Если $x_i > \bar{x}_i$, принимаем $x_i = \bar{x}_i$.

На этом этапе также производится проверка на удовлетворение функциональным ограничением типа выражение (3.12). При неудовлетворении хотя бы одному ограничению данная точка исключается, после чего происходит возврат к шагу 2.

4. Вычисляется функция $f(\{x\})$. Если при минимизации $f(\{x\}) < f(\{x^*\})$, (максимизации $f(\{x\}) > f(\{x^*\})$), тогда принимаем $\{x^*\} = \{x\}$. Если $p < P$, увеличиваем p на 1 и переходим к шагу 2.

Если $p = P$ переходим к шагу 5.

5. Если $q < Q$ ($q > Q$):

- принимаем $\{x^q\} = \{x^*\}$;
- уменьшаем интервал поиска

$$\{z\} = \{z\}(1 - \varepsilon). \quad (4.33)$$

- увеличиваем Q на 1 и переходим к шагу 2.

Если $q = Q$ - заканчиваем вычисления.

В соответствии с вышеизложенным, процедура поиска рационального решения разбивается на два этапа, каждый из которых схематично представлен на рис. 4.3. В приложении Д приведен листинг программы реализации методики расчета рационального состава и производительности котлоагрегатов с НТКС с примером расчета в среде MatLab.

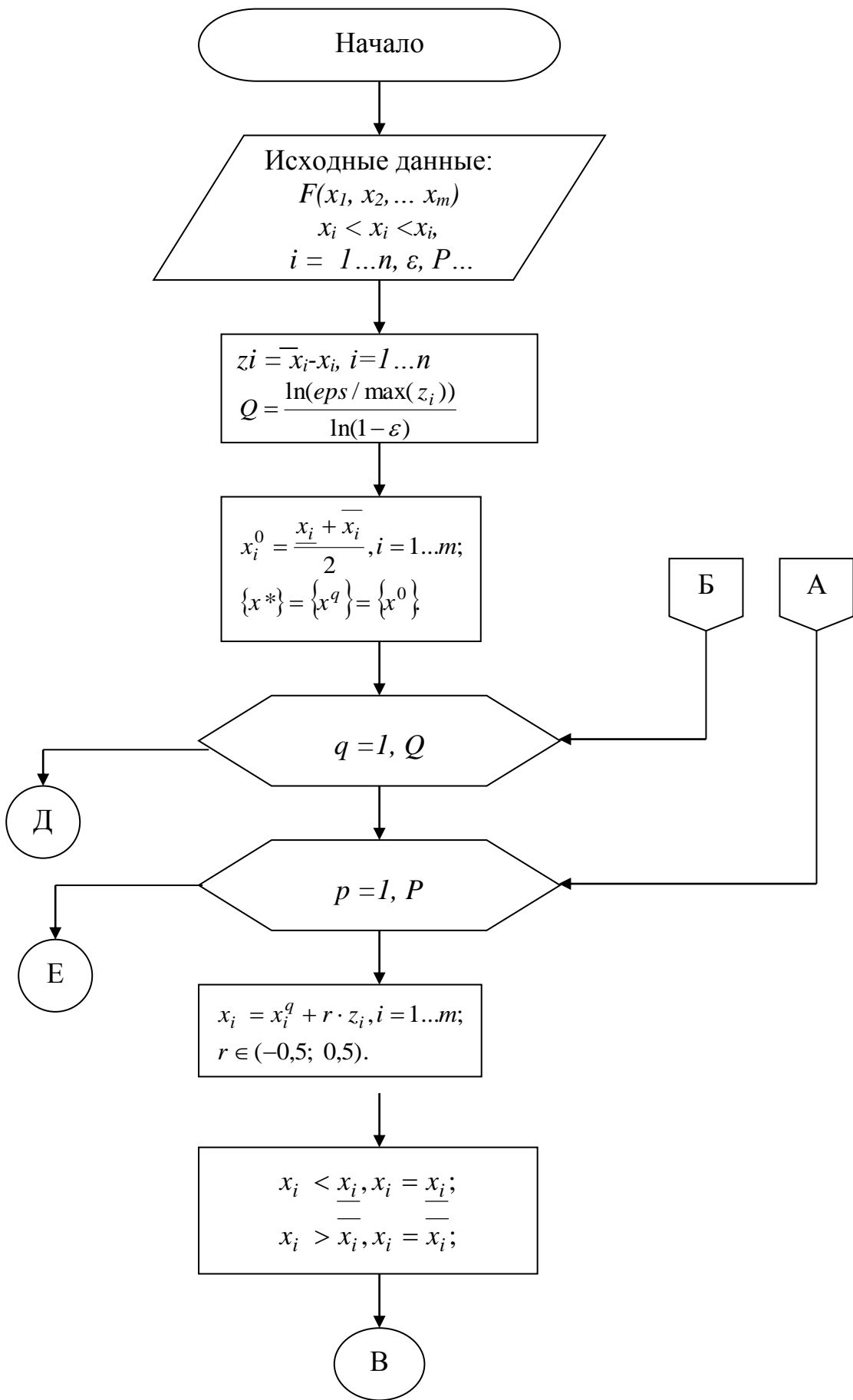
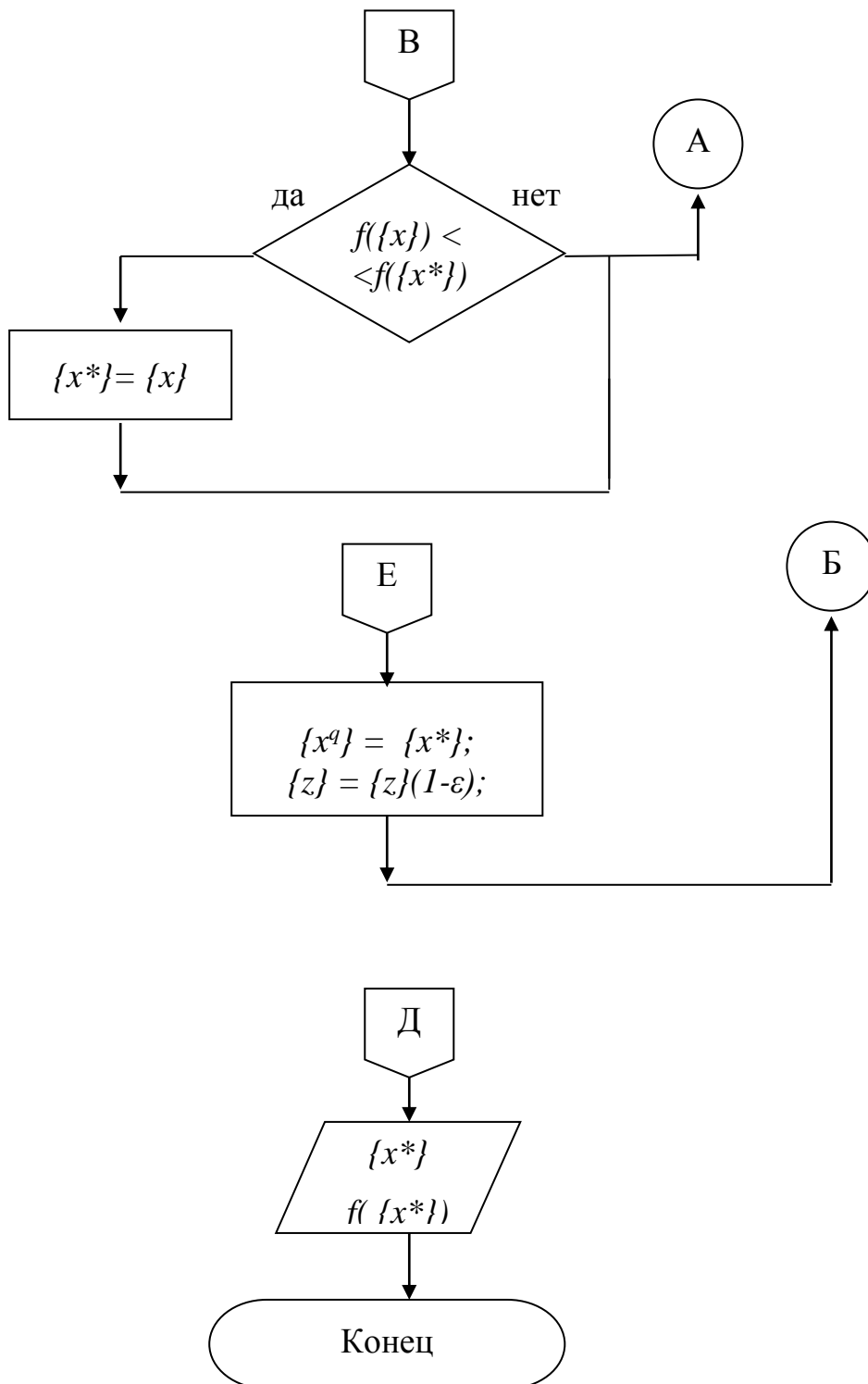


Рисунок 4.3 – Алгоритм локального поиска рациональной производительности котлоагрегата с НТКС



Продолжение рисунка 4.3

4.5 Выводы по четвертой главе

1. Определены критерии рациональной работы котлоагрегатов с НТКС при их совместной работе на сеть – достижение максимального средневзвешенного КПД котлов и минимизация затрат твердого топлива при наложенных ограничениях по суммарной производительности котлоагрегатов и времени достижения заданного состояния каждым из них в диапазонах рабочей производительности каждого котла.

2. Разработан метод и предложена методика расчета рационального состава группы котлоагрегата с НТКС, а также рациональной производительности каждого котла с учетом прогнозного теплового спроса шахтных абонентов в соответствии с определенными выше критериями. С этой целью используется метод случайного поиска "прямые выборочные процедуры с уменьшением интервала поиска", который является наиболее эффективным для решения многоэкстремумных задач, поскольку он не связан с использованием производной, в связи с чем снимается требование гладкости (непрерывности и дифференцируемости) функции.

ГЛАВА 5 КОНСТРУКТИВНАЯ РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВОМ ТЕПЛОТЫ В СИСТЕМЕ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ШАХТЫ

5.1 Обзор современных технических решений по автоматизации котлоагрегатов с НТКС

Проведем обзор современных технических решений по автоматизации таких технологических объектов, как котлоагрегаты с топками НТКС.

Система «Контур» осуществляет регулирование технологических параметров котельной установки (высота, температура НТКС, давление дутьевого воздуха, разрежение над топкой и др.) по нескольким разомкнутым контурам. В качестве регулятора используется регулятор Р.25, который на основании полученной информации формирует сигналы постоянного и переменного токов для управления исполнительными механизмами МЭО-73. Контроль за состоянием технологических параметров осуществляется их визуальным образом с помощью измерительных показывающих стрелочных приборов [27], [101].

Измеритель-регулятор двухканальный 2TRM1 фирмы ОВЕН предназначен для измерения, регистрации или регулирования температуры теплоносителей и различных сред в холодильной технике, сушильных шкафах, печах различного назначения и другом технологическом оборудовании, а также для измерения других физических параметров (веса, давления, влажности и др.) [104, 106, 131].

Пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор с универсальным входом ОВЕН TRM101 предназначен для измерения и регулирования температуры или другой физической величины. Дополнительным преимуществом этого регулятора можно считать наличие универсального входа для подключения широкого спектра первичных преобразователей [131].

Реле-регулятор с таймером TRM501 предназначен для регулирования температуры или других физических величин в технологических процессах, в которых требуется точное соблюдение временных режимов [131].

Измеритель ПИД-регулятор с дополнительным реле ТРМ10 предназначен для измерения входного параметра, импульсного или аналогового управления нагрузкой по пропорционально-интегрально-дифференциальным (ПИД) закону [89], а также для формирования дополнительного сигнала, который может быть использован для сигнализации о выходе параметра за установленные пределы или двухпозиционного регулирования. Рекомендуется применять для управления объектами, обладающими повышенной инерционностью, где обычное двухпозиционное регулирование не обеспечивает необходимую точность [131].

Измеритель ПИД-регулятор для управления задвижками и трехходовыми клапанами ТРМ12 предназначен для автоматизации подачи теплоносителя в системе ГВС, газового или парового отопления, в теплообменники пастеризаторов, для управления газовыми горелками, управления положением золотника в охлаждающих машинах, а также в другом технологическом оборудовании, где используются запорно-регулирующие или трехходовые клапаны и задвижки с электроприводом. Представляет из себя одноканальный трехпозиционный ПИД-регулятор с одним входом для подключения датчика и микропроцессорным блоком обработки данных, формирует сигналы управления двумя выходными устройствами [106].

Универсальный измеритель-регулятор восьмиканальный ТРМ-138 предназначен для измерения, регистрации и регулирования физического параметра, одновременного управления несколькими (до 8-ми) исполнительными механизмами, а также для регистрации измеряемых параметров на ЭВМ [106].

Счетчик MULTICAL от фирмы KAMSTRUP применяется для измерения тепловой энергии и энергии охлаждения во всех типах систем (открытая, закрытая) с водой в качестве теплоносителя с температурой подающей трубопровода от 2 до 160⁰С. При установлении расходомеров и в подающем и в обратном трубопроводах, способен отслеживать утечки и разрывы в системах отопления / охлаждения, а также позволяет ограничивать мощность и расход воды путем подключения прибора к 3-х ходовому клапану, установленному в трубопроводе.

Автоматизированная система учета теплоты на базе теплосчетчика КМ-5 предназначена для автоматического считывания параметров теплопотребления с теплосчетчиков типа КМ-5, формирование отчетов для теплоснабжающей организации по отдельным теплосчетчикам, группе теплосчетчиков, центральных тепловых пунктах (ЦТП), автоматического мониторинга состояния теплосчетчиков и параметров системы теплоснабжения записи нештатных ситуаций в базу данных, отображение результатов мониторинга на графической схеме района.

После анализа функций описанных регуляторов относительно их использования в системе управления комплексом теплоснабжения шахты с котлоагрегатами с НТКС можно сделать вывод, что все наиболее известные на данный момент приборы и системы автоматизации процессов и распределения теплоты имеют следующие существенные недостатки:

- не позволяют рассчитывать требуемую производительность каждого котла с НТКС в группе по критерию максимального средневзвешенного КПД с учетом наложенных ограничений;
- не имеют возможности прогнозирования потребительского спроса на тепловую энергию в соответствии с изменяющимися внешними условиями;
- не позволяют осуществлять согласованное регулирование производительности топки НТКС по нескольким технологическим параметрам;
- не имеют возможности осуществлять рациональное распределение теплоносителя с учетом текущих потребностей каждого из потребителей.

5.2 Разработка структуры системы автоматизации группы котлоагрегатов с НТКС

Схема информационных потоков, формирующих состав данных, необходимый для решения задачи определения и обеспечения рационального состава и производительности группы котлоагрегатов НТКС, представлена на рисунке 5.1.

В соответствии с главой 4 требуемая суммарная полезная и полная производительности котлоагрегатов с НТКС определяются на основе прогноза теплового спроса потребителей.

Система автоматического управления (САУ) производительностью отдельного котлоагрегата используя методы управления котлоагрегатами с топками НТКС – по твердому топливу, по дутьевому воздуху и по степени погружения в слой ППН, обеспечивает заданную тепловую нагрузку каждого котлоагрегата в соответствии с требуемым режимом работы.

Определим требования и функции разрабатываемой системы управления.

Разрабатываемая система автоматизированного управления производством и распределением теплоты в системе теплоснабжения шахты должна выполнять следующие функции [125, 127]:

- прогнозировать тепловой спрос абонентов в заданной временной перспективе в соответствии с текущими условиями окружающей среды, а также фактическими теплотехническими показателями шахтных зданий и сооружений. Вырабатывать текущее задание по производительности шахтной котельной;

- в соответствии с заданием определять рациональный состав котлоагрегатов с НТКС и производительность каждого по критерию максимального средневзвешенного КПД с учетом наложенных ограничений по производительности каждого котла, а также по допустимому времени переходных процессов. Вырабатывать текущее задание по производительности каждого котлоагрегата с НТКС;

- регулировать производительность каждого котлоагрегата с НТКС согласно полученного задания; определять наиболее рациональный способ достижения и поддержания требуемой уставки в соответствии с текущими значениями технологических параметров топки;

- регулировать распределение теплоты между потребителями согласно их текущим температурным характеристикам, категорийности и безаварийности функционирования системы теплоснабжения соответственно.

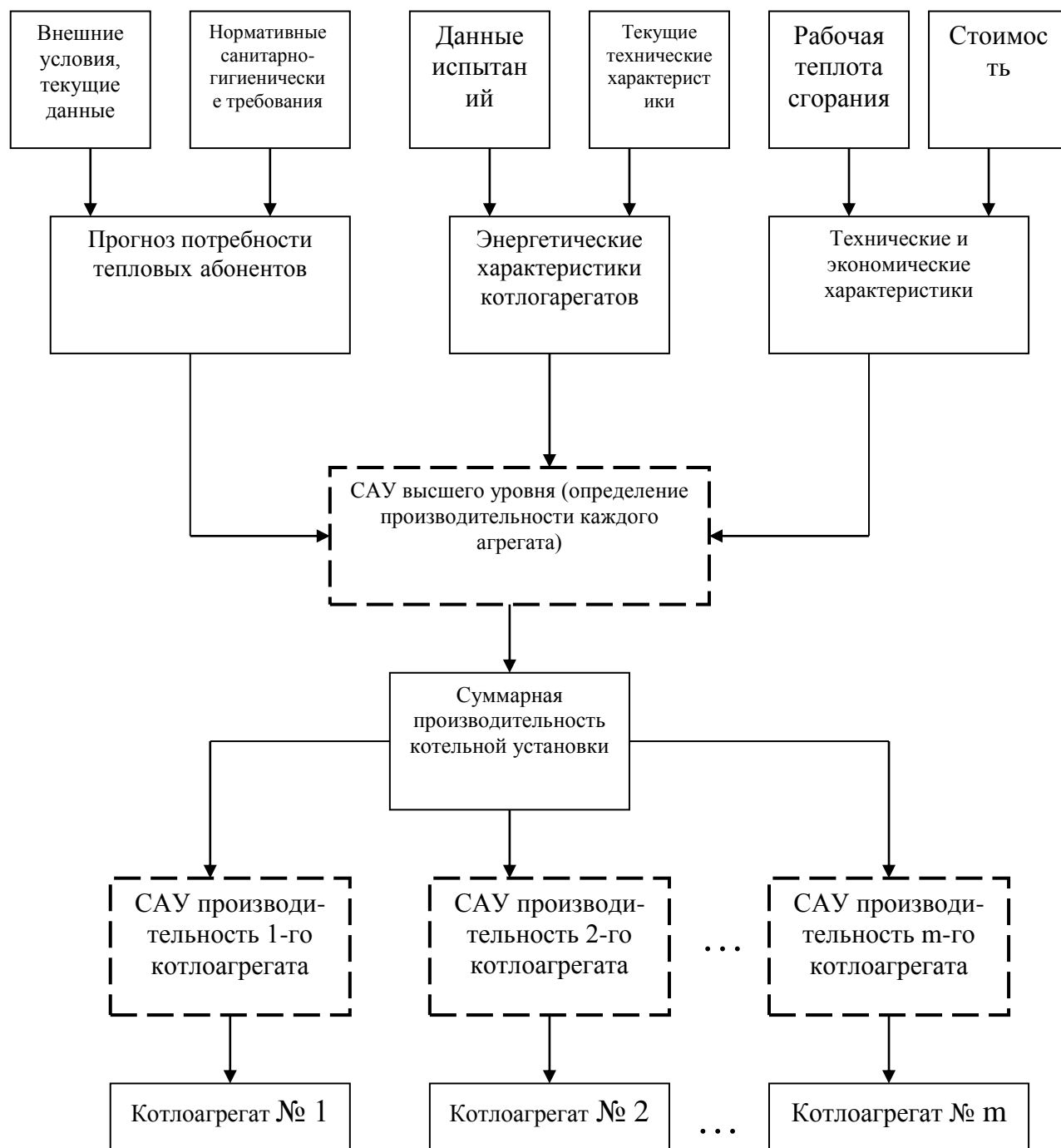


Рисунок 5.1 – Схема информационных потоков при решении задачи поиска рационального состава и производительности котлоагрегатов с НТКС

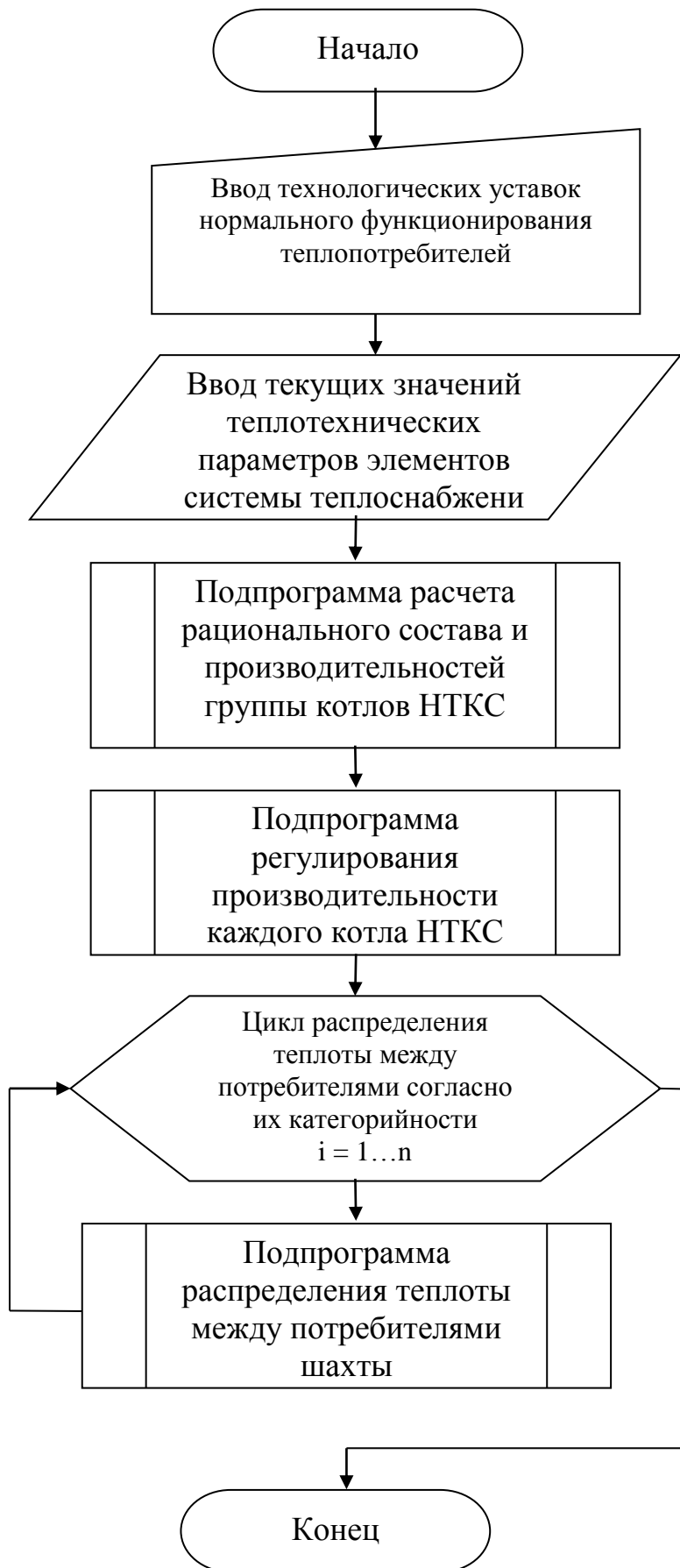


Рисунок 5.2 – Алгоритм работы автоматической системы управления производством теплоты группой котлоагрегатов с НТКС

Согласно выдвинутым требованиям к системе управления разработаны ее обобщенный алгоритм функционирования и структурная схема [66], приведенные на рис.5.2 и рис. 5.3 соответственно.

Как видим, разработанная САУ двухуровневая и состоит из нескольких параллельных подсистем управления первого уровня производительности каждого котла НТКС, и одной верхней системы, рассчитывающей задания на работу каждой нижней системы по критериям (4.1...4.5).

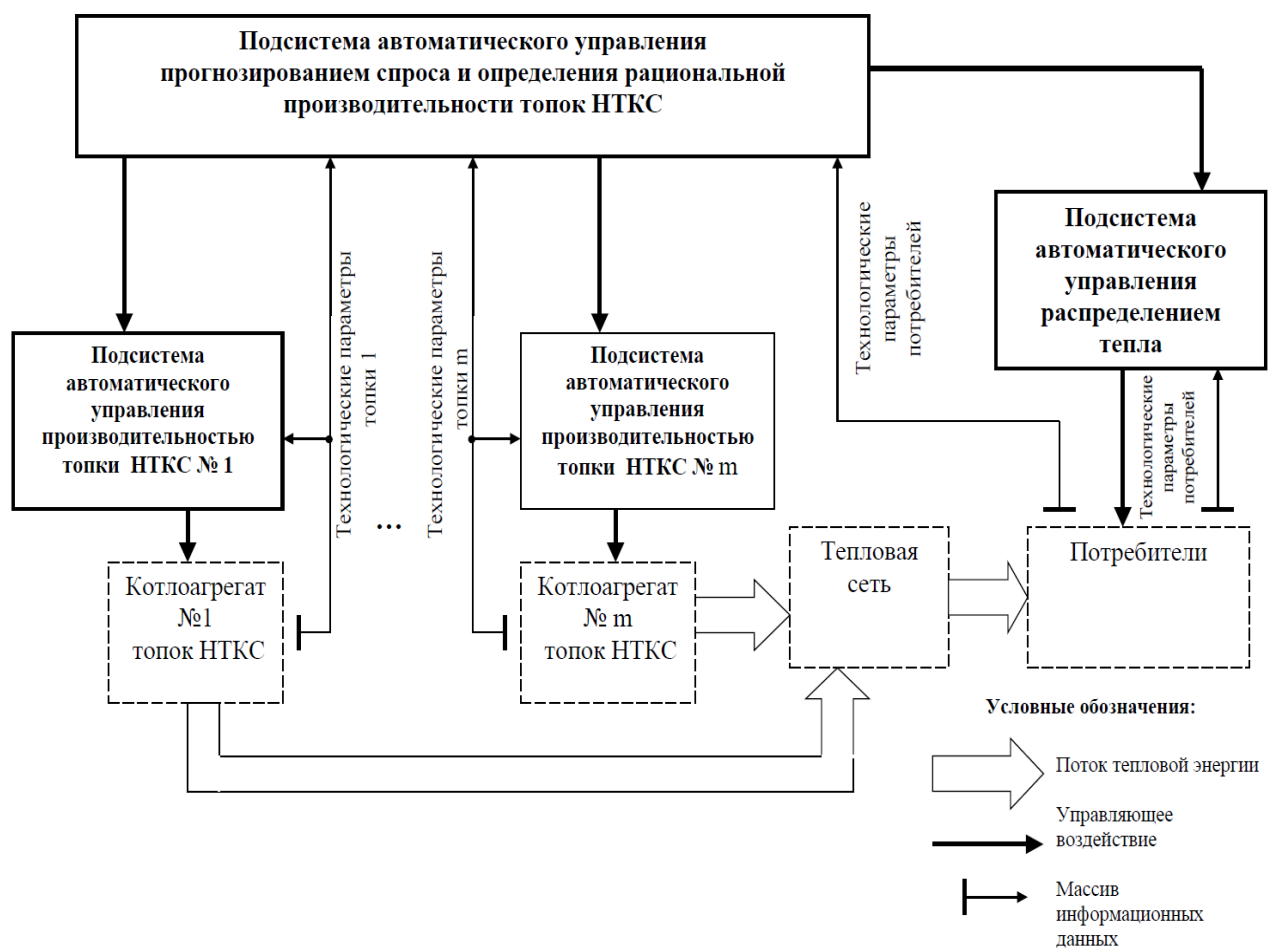


Рисунок 5.3 – Структурная схема автоматической системы управления производством теплоты группой котлоагрегатов с НТКС

Для практической реализации системы автоматического управления котлоагрегатом с НТКС предлагаем структурную схему, приведенную на рисунке 5.4.

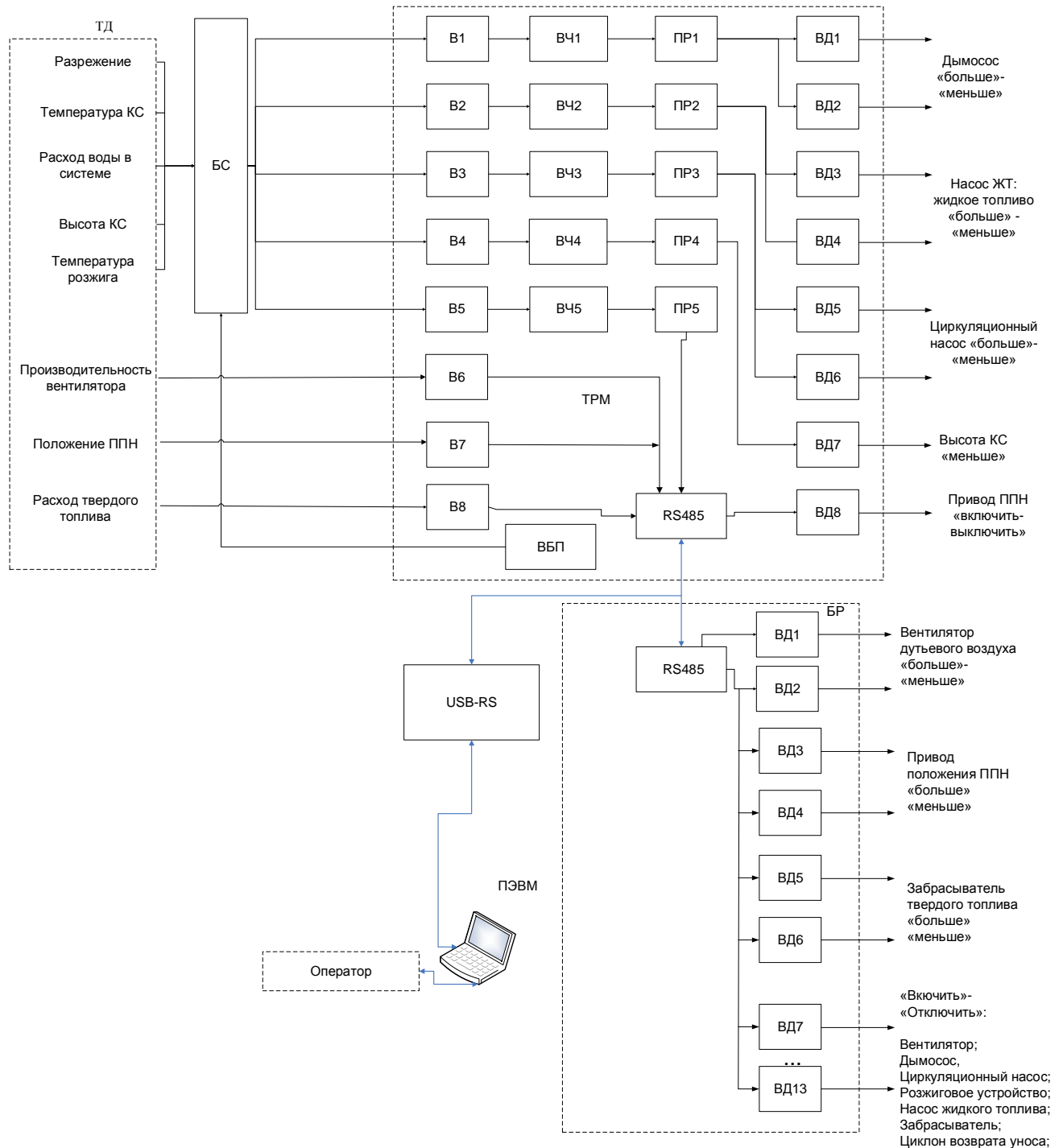


Рисунок 5.4 – Структурная схема системы автоматизации

В состав системы входят следующие компоненты:

ТД - технологические датчики (более подробно рассмотрены в следующем пункте);

БС - блок согласования технологических датчиков с регулятором;

ТРМ - универсальный ПИД-регулятор шестнадцатиканальный ТРМ-148-р;

В - входные элементы;

ВЧ - вычислители;

ПР - программные регуляторы;

ВД - выходные элементы;

БР - блок развязки дискретных элементов - модуль дискретного вывода;

USB-RS - преобразователь USB-RS485;

ВБП - встроенный блок питания.

ПИД-регулятор восьмиканальный ТРМ-148-р [106] предназначен для измерения и автоматического регулирования температуры, а также других физических параметров, значения которых первичными преобразователями (датчиками) может быть преобразовано в напряжение постоянного тока или унифицированный электрический сигнал. Информация о любом из измеренных физических параметров может отображаться в цифровом виде на встроенном индикаторе.

Основные функции прибора:

- измерение физических параметров объекта, контролируемых входными первичными преобразователями;
- цифровая фильтрация измеренных параметров от промышленных импульсных помех;
- коррекция измеренных параметров для устранения погрешностей первичных преобразователей;
- вычисления значений параметров объекта по заданной формуле;
- отображение результатов измерений или вычислений на встроенном светодиодном четырехразрядный цифровом индикаторе;

- регулирования физической величины по ПИД-закону или двухпозиционному закону;
- реализацию коррекции регулируемой физической величины в соответствии с графиками изменения задаваемых в зависимости как от внешних параметров, так и/или от времени;
- регистрация измеренной или вычисленной физической величины;
- формирование аварийного сигнала при обнаружении неисправности первичных преобразователей с отображением его причины на цифровом индикаторе;
- формирование аварийного сигнала при выходе регулируемой величины за допустимые пределы;
- формирование аварийного сигнала при обнаружении неисправности исполнительного механизма;
- отображение заданных параметров регулирования на встроенном светодиодном цифровом индикаторе;
- передачу в сеть RS_485 текущих значений измеренных или вычисленных величин, а также выходного сигнала регулятора и параметров состояния объекта.

Прибор ТРМ148 спроектирован и реализован с возможностью настройки параметров своего функционирования и сохранения рабочей информации:

- изменение значений программируемых параметров прибора с помощью встроенной клавиатуры управления;
- изменение значений параметров с помощью компьютерной программы конфигуратора при связи с компьютером по RS-485;
- формирование команды ручного управления исполнительными механизмами и устройствами с клавиатуры прибора;
- сохранение заданных программируемых параметров в энергонезависимой памяти при отключении напряжения питания прибора

Основные технические характеристики прибора ТРМ148 приведены в таблице. 5.1.

Таблица 5.1 – Характеристики прибора ТРМ148

Наименование	Значения
Диапазон переменного напряжения питания :	
напряжение, В	90...264
частота, Гц	47...63
Потребляемая мощность, ВА, не более	12
Количество каналов измерения	8
Время опроса одного канала, с, не более	0,4
Предел основной приведенной погрешности при измерениях:	
Термоэлектрическими преобразователями, %	+0,5
термометрами сопротивления и унифицированными сигналами постоянного напряжения и тока, %	+0,25
Количество каналов	8
Количество выходных элементов	8
Интерфейс связи с компьютером	RS_485
Протокол передачи данных по RS_485	ОВЕН
Напряжение встроенного источника питания, В	24 ± 3
Максимально допустимый ток встроенного источника питания, мА	180
Мера защиты корпуса (со стороны лицевой панели)	IP54
Габаритные размеры прибора, мм	(96x96x145)±1
Масса прибора, кг, не более	1,5
Средний срок службы, лет	8
Средняя наработка на отказ, часы	100 000

В качестве исходных элементов выбраны электромагнитные реле с характеристиками: 4 А при напряжении не более 220 В 50 Гц и $\cos \varphi > 0,4$.

Модуль дискретного вывода OBEH MY110-8P работает в сети RS - 485 по протоколам OBEH, ModBus - RTU, ModBus - ASCII, DCON.

Конфигурация MY110 осуществляется на ПК через адаптер интерфейса RS - 485 / USB (AC4).

Прибор предназначен для управления по сигналам из сети RS - 485 встроенными дискретными элементами, используемыми для подключения исполнительных механизмов с дискретным управлением. В качестве исходных элементов выбраны электромагнитные реле с характеристиками: 4 А при напряжении не более 220 В 50 Гц и $\cos \varphi > 0,4$.

Автоматический преобразователь интерфейсов USB / RS - 485 AC4 предназначен для взаимного преобразования сигналов интерфейсов USB и RS - 485. Позволяет подключать к промышленной информационной сети RS - 485 персональный компьютер, USB-порт, со следующими характеристиками.

Технические характеристики:

Интерфейс USB:

Стандарт интерфейса	USB 2.0;
Длина линии связи с внешним устройством	не более 3 м;
Скорость обмена данными	до 115200 бит/с;

Интерфейс RS – 485:

Длина линии связи с внешним устройством	не более 1200 м;
Количество приборов в сети:	
– без использования усилителя сигнала	не более 32;
– с использованием усилителя сигнала	не более 256.

В качестве программного обеспечения ПЭВМ выбрана система MasterSCADA фирмы ИнСАТ, которая предназначена для создания полномасштабных систем автоматизации в различных отраслях промышленности. Основной ее особенностью является объектный подход, использованный на уровне описания системы при ее настройке на конкретный объект автоматизации.

Технологический блок и физическое устройство при создании проекта с помощью MasterSCADA рассматриваются как отдельные объекты. Для каждого объекта создается свой описание на технологическом языке программирования. Описание включает свойства объекта и документы объекта. Свойствами могут быть период опроса, способ линеаризации датчика, диапазон входных сигналов. Документами объекта является его изображение, мнемосхема, график изменения переменных. Такой подход позволяет легко размножать один раз созданные объекты, повышает скорость настройки SCADA на задачи пользователя.

5.3 Разработка принципиальной схемы блока согласования технологических датчиков с регулятором системы автоматизации котлоагрегата с НТКС

Для измерения разрежения дымососа используется дифтягомер типа ДТ2-50. Вторичный преобразователь типа КСДЗ работает по дифтрансформаторной схеме с выходным напряжением 0...0,5 В переменного тока.

Расход воздуха в топку измеряется дифманометром типа ДМ3583М. Максимальный уровень сигнала вторичного преобразователя 0,5 В переменного тока. Перепад давления в слое и над слоем, для контроля высоты слоя, измеряется дифманометром типа ДМ3583М с вторичным преобразователем, аналогичным датчику расхода воздуха.

Температура КС измеряется термоэлектрическим преобразователем типа ТХА 706-02 [52,136] с чувствительностью 30 мкВ/°С и инерционностью установления показаний 60 секунд.

Температура теплоносителя измеряется термоэлектрическим преобразователем типа ТХК-0515 [30, 52] с чувствительностью 24 мкВ/°С и инерционностью установления показателей 60 секунд.

При использовании модуля аналогового ввода с уровнем входного напряжения ± 10 В и разрешением 10 бит для обеспечения высокой точности преобразования этим модулем сигналов датчиков, нужно соответствие

максимального уровня их выходного напряжения входном напряжении модуля. Таким образом, максимальный усиленный сигнал с датчиков должен составлять порядка 10 В. Для согласования уровней сигналов датчиков с входами модуля аналогового ввода служит блок согласования. Электрическая принципиальная схема блока согласования БС изображена на рис. 5.5, перечень элементов блока приведен в приложении Е. Блок БС состоит из пяти усилителей, полностью идентичных схематично, выполненных на микросхемах DA1 – DA5 типа К140УД12 (техническая характеристика приведена в таблице 5.2).

Таблица 5.2 - Основные параметры операционного усилителя К140УД12

Параметр	Обозначение	Единица	Значение
Входной ток	I_{BX}	нА	50
Входное сопротивление	R_{BX}	кОм	500
Коэффициент усиления напряжения	K_U	—	>100
Выходное сопротивление	$R_{ВЫХ}$	Ом	1000
Максимальный выходной ток	$I_{ВЫХ\ MAX}$	мА	10
Максимальное выходное напряжение	$U_{ВЫХ\ MAX}$	В	± 10
Максимальное входное напряжение	$U_{ВЫХ\ MIN}$	В	± 10
Напряжение питания	$U_{П}$	В	$\pm 3 \dots 18$
Ток потребления	$I_{ПОТ}$	мА	0,17
Наличие внутренней коррекции	—	—	Есть
Защита выхода от короткого замыкания	—	—	Есть

Цепи коррекции ОУ К140УД12 состоят из резисторов $R14$ и $R15$ номиналами в соответствии с 10 кОм и 100 кОм типа МЛТ-0,125.

Соотношение номиналов резисторов $R13/R12$ характеризует коэффициент усиления усилителя по напряжению K . Усилители DA1, DA2 и DA3 служат для усиления сигналов соответственно с дифтягомера, с манометра измерения расхода воздуха в слой, с манометра измерения высоты слоя.

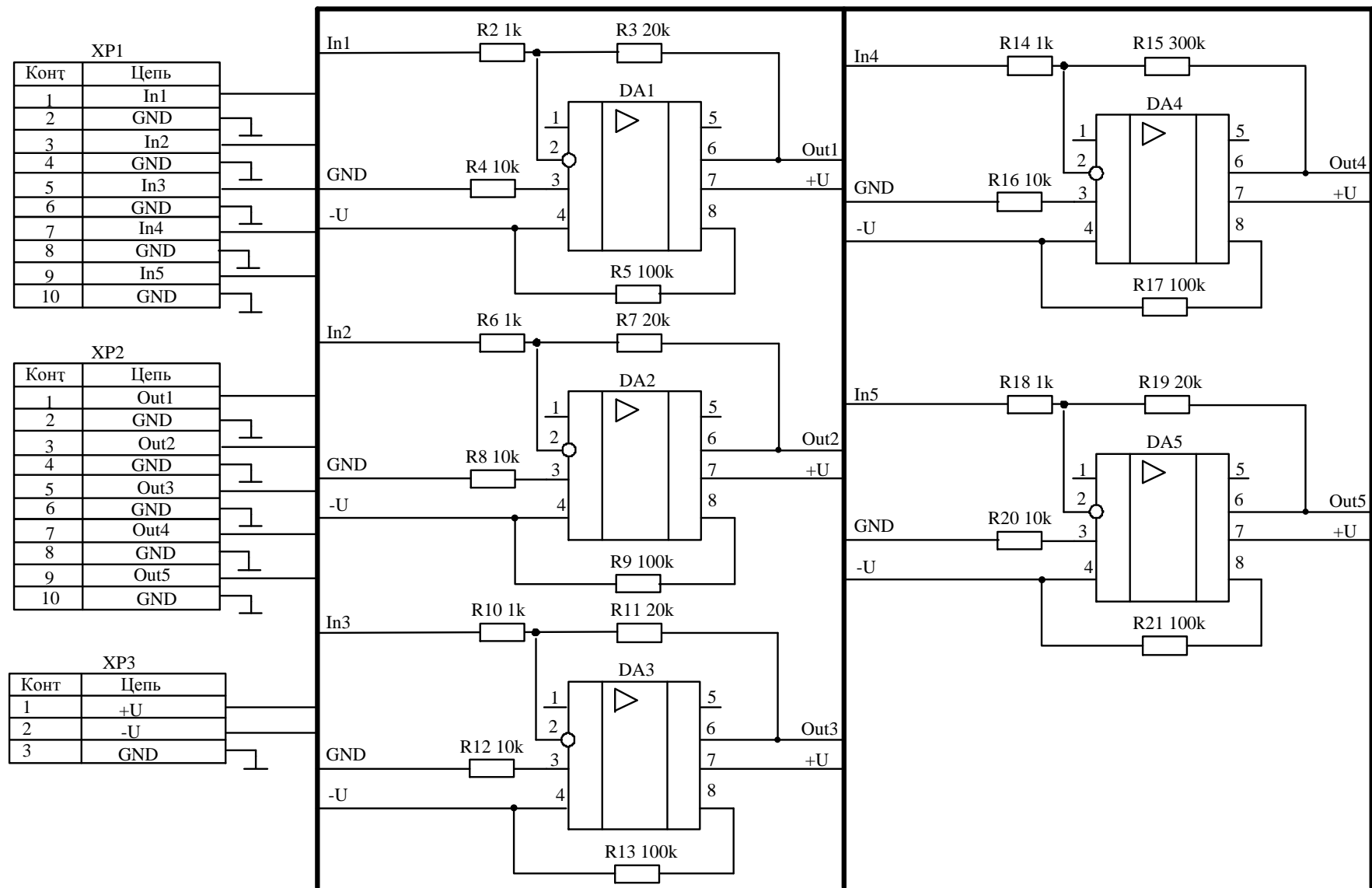


Рисунок. 5.5 – Принципиальная схема блока согласования технологических датчиков с регулятором

Вторичные преобразователи перечисленных датчиков одинаковы, поэтому усилители DA1, DA2 и DA3 полностью аналогичны по схеме и номиналам ее элементов. Усилители DA4 и DA5 используются для усиления сигнала термоэлектрических преобразователей измерения температуры КС и теплоносителя. Для усилителей DA1, DA2 и DA3 требуемый коэффициент усиления составит

$$K_{y1} = U_{BX.MAX} / U_{ВЫХ.ТД} = 10 / 0,5 = 20, \quad (5.1)$$

где $U_{BX.MAX}$ – максимальное входное напряжение модуля аналогового ввода ($U_{BX.MAX} = 10$ В);

$U_{ВЫХ.Д1}$ – максимальное напряжение на выходе дифтрансформаторного преобразователя датчика разрежения дымососа ($U_{ВЫХ.Д1} = 0,5$ В).

Принимаем сопротивление резистора $R2 = 1$ кОм. Тогда сопротивление резистора $R3$

$$R1 = R1 \cdot K_{y1} = 1 \cdot 20 = 20 \text{ кОм.} \quad (5.2)$$

Полученные значения $R12$ и $R13$ соответствуют стандартному ряду резисторов E96. Коэффициент усиления усилителя DA4

$$K_{y4} = U_{BX.MAX} / U_{ВЫХ.Т1} = R15 / R14, \quad (5.3)$$

где $U_{ВЫХ.Т1}$ – максимальное выходное напряжение, формируемое термопарой измерения температуры НТКС. При чувствительности термопары $30 \text{ мкВ}^{\circ}\text{C}$ и максимальной измеряемой температуре 1100°C , значение $U_{ВЫХ.Т1}$ составит $0,033$ В

$$K_{y4} = 10 / 0,033 = 300. \quad (5.4)$$

Принимаем сопротивление резистора $R14=1$ кОм. Сопротивление резистора $R15$ составит

$$R15 = R14 \cdot K_{y4} = 1 \cdot 300 = 300 \text{ кОм.} \quad (5.5)$$

Значения сопротивления резисторов $R14$ и $R15$ удовлетворяют требованиям стандартного ряда сопротивлений E96.

Коэффициент усиления усилителя DA5

$$K_{y5} = \frac{U_{BX.MAB.}}{U_{BЫX.T2.}} = \frac{R19}{R18}, \quad (5.6)$$

где $U_{BЫX.T2.}$ – максимальное выходное напряжение, развиваемое термопарой измерения температуры теплоносителя.

При чувствительности термопары $30 \text{ мкВ/}^{\circ}\text{C}$ и максимальной измеряемой температуре 1500°C , значение $U_{BЫX.T2.}$ составит $0,0045 \text{ В}$

$$K_{y5} = \frac{10}{0,0045} = 2222 \quad (5.7)$$

Принимаем сопротивление резистора $R18 = 1$ кОм. Сопротивление резистора $R19$ составит

$$R19 = R18 \cdot K_{y5} = 1 \cdot 2222 = 2222 \text{ кОм.} \quad (5.8)$$

Значение сопротивления резистора $R19$ принимаем равным $2,2 \text{ МОм}$ согласно стандартного ряда сопротивлений E96. Все резисторы блока принимаем БС типа МЛТ-0,125 с допустимым отклонением сопротивления от номинального $0,5\%$. Для питания операционных усилителей блока БС нужно

двуполярное напряжение $\pm 3,18$ В. Для получения двуполярного напряжения из однополярной напряжения блока питания регулятора, питание на блок БС подается через делитель согласно схеме (Рис.5.6).

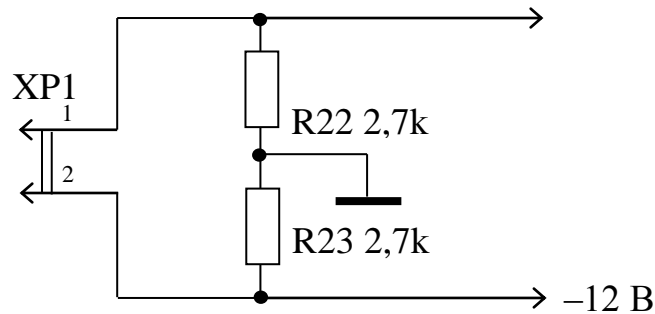


Рисунок 5.6 – Схема питания блока согласования

Сопротивления резисторов делителя подбираются так, чтобы мощность потребляемая делителем, была, по крайней мере, на порядок выше потребляемой мощности блока усилителей. Мощность, потребляемая блоком:

$$P_{бу} = 5 \cdot I_{\Pi} \cdot U_{\Pi}, \quad (5.9)$$

где I_{Π} – потребляемый ток операционного усилителя;

U_{Π} – напряжение питания усилителя.

$$P_{бу} = 5 \cdot 0,17 \cdot 12 = 10,2 \text{ мВт}. \quad (5.10)$$

Итак, мощность, потребляемая делителем, должна составлять около 100 мВт. Отсюда можно найти сопротивления делителей

$$R22 + R23 = \frac{U_{\Pi}^2}{P_{д}} = \frac{24^2}{0,1} = 5760 \text{ Ом}. \quad (5.11)$$

Согласно стандартному ряду сопротивлений принимаем сопротивление резисторов $R22 = R23 = 2,7 \text{ кОм}$ и тип МЛТ-0,25.

5.4. Экономическое обоснование эффективности внедрения системы автоматического управления производительностью котлоагрегатов с НТКС

По методике [135] рассчитываем капитальные затраты по выведенным и основным фондам, вновь вводимых. Расчет оформляем в виде таблицы 5.3.

Таблица 5.3 – Расчет капитальных затрат

Наименование основных фондов	Количество	Цена единицы, рос.руб.	Расходы на ЗИП, к 30% п.1 табл. 2.9.2, рос.руб.	Транспортно-заготовительные расходы, 5-8% гр.(3+4),рос.руб	Затраты на монтаж, (50-120%)·Ц, рос.руб.	Балансовая стоимость, рос.руб. 3+4+5+6
1	2	3	4	5	6	7
А. Фонды выводятся						
P25	4	3150	945	205,2	3150	7450,2
МТП160х0,1	3	390	117	25,8	390	922,8
ТНМП-52	1	288	86,4	19,2	288	681,6
КСД2-004	2	312	93,6	20,4	312	738
ДСП-778Н	1	516	154,8	33,6	516	1220,4
ДСС710Н	1	534	160,2	34,8	534	1263
ДМ-3583М	2	501	150,3	33	501	1185,6
Всего выведенные фонды:						13461,6
Б. Вводимые фонды.						
Блок согласования	1	3350	1005	261,3	3350	2966
ТРМ148р	1	14400	14400	1440	14400	39000
МУ110р	1	4800	4800	480	4800	12000
ПЕОМ	1	18000	18000	1800	18000	30000
АС4	1	3600	3600	360	3600	9000
Всего вводимые фонды:						92966

Рассчитаем годовую экономию условного топлива на примере котла КВКС-3,489, значения технологических параметров которого использовали для параметрической идентификации разрабатываемой математической модели котлоагрегата с топкой НТКС. Его номинальная мощность равна $Q_{pol}^n = 3,489 \text{ МВт}$. КПД котла при работе на номинальной мощности равен $\eta_{k.a.}^n = 80\%$ [77]. Номинальный часовой расход условного топлива найдем как:

$$B_n = \frac{Q_{k.a.}^n \cdot 3600}{Q_{n.ut}^p \cdot \eta_{pol}^n},$$

где $Q_{n.ut}^p$ - удельная теплота сгорания условного топлива, Дж/кг;

$$B_n = \frac{3,49 \cdot 3600}{29,3 \cdot 0,8} = 536 \text{ кг.у.т./ч.}$$

Источником экономической эффективности будет являться сокращение часового расхода условного топлива за счет повышения средневзвешенного КПД группы котлоагрегатов. Рассчитаем расход условного топлива при повышении средневзвешенного КПД всех котлоагрегатов с НТКС на минимальные 2%

$$B'_n = \frac{3,49 \cdot 3600}{29,3 \cdot 0,82} = 523 \text{ кг.у.т./ч.}$$

Часовая экономия топлива составит

$$\Delta B = B'_n - B_n = 536 - 523 = 13 \text{ кг.}$$

Годовая экономия по данному котельному котлоагрегату, с учетом длительности отопительного сезона $Not = 176$ дней составит

$$\Delta B_y = 24 \Delta B \cdot N_{om} = 24 \cdot 13 \cdot 176 = 54,9 \text{ т.у.т./год.}$$

Или с учетом применяемой марки топлива (приложение А)

$$\Delta B_y^p = \Delta B_y \cdot E = 54,9 \cdot 1,6 = 87,84 \text{ т/год}$$

Рассчитаем рыночную стоимость сэкономленного топлива

$$E_t = C_t \cdot \Delta B_y^p,$$

где $C_t = 2000$ рос.руб./т – цена 1 т угля;

$$E_t = 2000 \cdot 87,84 = 175\,680 \text{ рос.руб.}$$

Поскольку разрабатываемое устройство полностью заменяет базовую устаревшую аппаратуру, срок амортизации которой истек, то нет необходимости рассчитывать капитальные затраты по выведению старой аппаратуры. Следовательно

$$\Delta K = K_{new} = 92\,966 \text{ рос.руб.}$$

Расчет годовой экономии

Суммарная годовая экономия эксплуатационных расходов равна

$$\Sigma E_{exp} = E_t - E_M - A_{ot},$$

где E_t – годовая экономия по расходу условного топлива за счет рационализации режима работы котельных агрегатов, рос.руб;

E_M – ежегодные дополнительные издержки на материалы и запасные части вновь введенного оборудования, рос.руб;

A_{ot} – годовые амортизационные отчисления по новому оборудованию.

Поскольку введенный прибор не имеет аналогов на шахте, то относим его ко второй группе. Расходы на его эксплуатацию можно рассчитать по формуле

$$E_M = 0,05 \cdot K_{нов} = 0,05 \cdot 92\,966 = 4648 \text{ руб/год.} \quad (5.12)$$

Годовые амортизационные отчисления по новым введенным фондам

$$A_{ot} = H_a \cdot K_{new} = 0,25 \cdot 92\,966 = 23241 \text{ рос.руб/год,}$$

где H_a – норма амортизации, $H_a = 25\%$.

Годовая экономия эксплуатационных расходов ($\Sigma E_{экс}$)

$$\Sigma E_{exp} = 175680 - 23241 - 4648 = 147\,791 \text{ руб/год.}$$

В результате внедрения в производственный процесс проектируемой системы автоматического управления, получим готовую экономию по одному котлоагрегату типа КВКС-3,489 с номинальной мощностью 3,49 МВт более 140 тыс.рос.руб. в год.

5.6 Выводы по пятой главе

1. Обоснованы структура технической реализации и алгоритм работы автоматической системы управления производством и распределением теплоты в системе теплоснабжения шахты.

2. Определены информационные потоки, необходимые для автоматического решения задачи поиска рационального состава группы

котлоагрегатов с НТКС и производительности каждого котла системой автоматического управления теплоснабжением шахты.

3. Определены типы датчиков технологических параметров, вид промышленной ЭВМ для реализации САУ высшего уровня, разработаны схемотехнические решения регулятора технологических параметров на современной элементной базе.

4. Осуществлен расчет ожидаемого экономического эффекта от внедрения разработанной САУ на шахте.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

В ходе диссертационных исследований решена прикладная научно-техническая задача повышения эффективности системы теплоснабжения шахты с котлоагрегатами с НТКС.

Основные научные выводы и результаты работы заключаются в следующем:

— исследованы технологические особенности шахтных систем теплоснабжения и перспективы использования котлоагрегатов с НТКС в качестве источников теплоты в шахтной системе теплоснабжения, осуществлены рекомендации относительно перехода к эффективным схемам теплоснабжения горного предприятия. Установлено, что рационально в качестве теплогенерирующих установок применять группу котлоагрегатов с НТКС, а отпуск теплоты осуществлять по прогнозируемому спросу во временной перспективе, достаточной для компенсации инерционности всех элементов системы теплоснабжения. Подобный подход дает возможность использовать уголь с зольностью до 70% и реализовывать оперативное автоматическое управление работой котлов. Обоснована целесообразность многопараметрического автоматического регулирования производительности котлоагрегатов с НТКС: по расходу твердого топлива, по расходу дутьевого воздуха, по степени погружения ППН в слой для выполнения критериев их рациональной работы и безаварийного функционирования;

— разработана математическая модель производства и распределения тепловых потоков в котлоагрегате с топкой НТКС с учетом характеристик ППН, на базе которой возможно рассчитывать значения технологических параметров котлов при различных производительностях и определять рекомендуемую к промышленному использованию зависимость $\eta_{k.a.} = f(Q_{pol})$ для каждого котла. Разработанная на базе математической динамическая компьютерная модель позволяет прогнозировать поведение кипящего слоя в динамике при различных

комбинациях управляющих воздействия, что делает возможным разработку системы автоматического управления работой котла;

- проведено экспериментальное исследование работы топок НТКС при различных управляющих воздействиях, что позволило уточнить зависимости тепловой производительности котлоагрегата от расхода твердого топлива и расхода дутьевого воздуха, что отражено в разработанной математической модели;

- предложен критерий рациональной работы группы котельных агрегатов с топками НТКС по максимальному средневзвешенному КПД группы котлов с учетом текущего состояния каждого котлоагрегата. Данный критерий используется в качестве целевой функции при определении производительности и режимных параметров котлов с НТКС системой автоматического управления котлами;

- разработаны метод и алгоритм поиска рационального состава и производительности группы котлоагрегатов с НТКС при их совместной работе на тепловую сеть. На их основе реализована методика расчетов в виде программного комплекса. В результате ее применения стало возможным определять рациональный состав котлов, находящихся в работе, тепловую производительность и режим работы каждого котлоагрегата в соответствии с прогнозируемым тепловым спросом абонентов. Применение разработанного метода позволяет повысить средневзвешенный КПД группы котлов на 2 - 4%;

- разработана структура и алгоритм функционирования системы автоматического управления производством теплоты в системе теплоснабжения шахты. Предложена техническая реализация системы на современной программно-аппаратной базе. При внедрении данной системы на шахте на примере группы котлоагрегатов типа КВКС-3,489 с топкой НТКС ожидаемая годовая экономия условного топлива по одному котлоагрегату составит 54,9 т.у.т./год, экономический эффект составит более 140 тыс. руб./год.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Al-Shemmeri, T.** Energy audits: a workbook for energy management in buildings / Tarik Al - Shemmeri. – Iowa: Wiley-Blackwell, 2011. – 292 p.
2. **Baron, R. E.** Mathematical model for predicting efficiency of fluidized bed steam generators / **R. E. Baron**, J. L. Hodges, A. F. Sarofim. – AIChE Symp. Ser.,- 1978, - vol. 74, №176,- P. 120—125.
3. **Bengt, Sundén.** Advanced Computational Methods in Heat Transfer VIII / **Sundén Bengt**, C. A. Brebbia.. – WIT Press, 2004. – 340 p.
4. **Bengt, Sundén.** Modelling and Simulation of Turbulent Heat Transfer / **Bengt, Sundén**, Mohammad Faghri. - WIT Press, 2005. – 360 p.
5. **Dikop, V.V.** Computer models of heat supply networks and circulating systems / V.V. Dikop, V.A. Kudinov // Thermal Engineering, MAIK Nauka/Interperiodica. – 2008. – Vol. 53. No. 8. – P. 655-658.
6. **Grebenyuk G. G.** Algorithms for optimization of the number of switchings in heat supply networks reconfiguration / G. G. Grebenyuk, A. A. Krygin // Automation and Remote Control, MAIK Nauka/Interperiodica. – 2008. – Vol. 68, No. 12. – P. 2187–2197
7. Heat and mass-transfer modeling of an angled gas-jet LCVD system. Duty, C., Johnson, R. (et al.) // Applied Physics A, Springer, - 2003, -vol. 0, № 5, - P. 697-705
8. **Jean, Baptiste.** The Analytical Theory of Heat / Baptiste Jean, Joseph Fourier. - Courier Dover Publications, 2003. - 496 p.
9. **Katalin M. Hangos.** Analysis and Control of Nonlinear Process Systems / Hangos M. Katalin, J. Bokor, Szederkényi Gábor. - Springer, 2004. – 212 p.
10. **Mitchell, J. W.** Principles of heating, ventilation, and air conditioning in buildings / John W. Mitchell, James E. Braun. – N. J. : Wiley, 2013. – 600 p.
11. **Prabir, Basu.** Combustion and Gasification in Fluidized Beds / Basu Prabir. – CRC Press, 2006. – 473 p.

12. **Sadık, Kakaç**, Heat Exchangers: Selection, Rating, and Thermal Design / Kakaç Sadık, Liu Hongtan. - CRC Press, 2002. – 520 p.
13. **Shlyannikov, V.N.** Dimensionless fracture resistance parameters for cyclic mixed modes loading / V.N Shlyannikov, B.V. Ilchenko // ICF Interquadrennial Conference Fracture Mechanics in Design of Fracture Resistant Material and Structures. Full papers. 2007.
14. **Simeon, Oka**. Fluidized Bed Combustion / Oka Simeon. – New York : CRC Press, 2004. – 616 p.
15. **Soteris, Kalogirou**. Artificial Intelligence in Energy and Renewable Energy Systems / Kalogirou Soteris. - Nova Publishers, 2006. – 471 p.
16. **Srinivasa, Lingireddy**. Artificial Neural Networks in Water Supply Engineering / Lingireddy Srinivasa, Brion Gail Montgomery. - ASCE Publications, 2005. – 173 p.
17. **Tanase, G. Dobre**. Chemical Engineering: Modelling, Simulation and Similitude / G. Dobre Tanase, José G. S. Marcano . - Wiley-VCH, 2007. - 568 p.
18. **Tuncer, Cebeci**. Convective Heat Transfer / Cebeci Tuncer - Springer, 2002. – 245 p.
19. **Volker, Hessel**. Chemical Micro Process Engineering: Fundamentals, Modelling and Reactions / Hessel Volker, Steffen Hardt, Holger Löwe . - Wiley-VCH, 2006. - 712 p.
20. **Wolfgang, Rodi, M. Mulas**. Engineering Turbulence Modelling and Experiments 6 / Rodi, Wolfgang, M. Mulas. - Elsevier, 2005. – 1012 p.
21. **Адрианов, Д.Е.** Экономия энергии путем управления тепловыми сетями на промышленном предприятии / Д.Е. Адрианов, Р.А. Штыков // Промышленная энергетика. - 2003, № 6, -С. 2 – 5.
22. **Аксенов, М.А.** Тепловые сети. Устройство, эксплуатация, ремонт / М.А. Аксенов // Издание третье, перераб и доп.- М.: Государственное энергетическое издательство, 1958. – 328 с.
23. **Александрова, Е.А.** Особенности теплового режима помещений при поквартирном теплоснабжении / Е.А. Александрова, К.А. Астахова,

- А.С. Семиненко // Международный студенческий научный вестник. 2015. - № 3-1. С. 91-93.
24. **Ануфриев, И.Е.** Самоучитель MATLAB 5.3/6.x / И.Е. Ануфриев. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003. – 736 с.: ил.
 25. **Балакирев, В.С.** и др. Экспериментальное определение динамических характеристик промышленных объектов управления / В.С. Балакирев - М.: «Энергия», 1967.
 26. **Баскаков, А.П.** Расчеты аппаратов кипящего слоя: Справочник [Текст]/А.П. Баскаков, Б.П. Лукачевский, И.П. Мухленов и др.// - Л.: Химия, 1986. – 352 с.
 27. **Батицкий, В. А.** Автоматизация производственных процессов и АСУ ТП в горной промышленности / В. А. Батицкий, В. И. Куроедов, А.А. Рыжков//—2-е изд., перераб. и доп.—М.: Недра, 1991.— 303 с: ил.
 28. **Бородуля, В. А.,** Сжигание твердого топлива в псевдоожиженном слое / В. А. Бородуля, Л. М. Виноградов Мн.: Наука и техника, 1980. -192 с.
 29. **Бородуля, В.А.** Математические модели химических реакторов с кипящим слоем / В.А. Бородуля, Ю.П. Гупало. Мн.: «Наука и техника», 1976. - 208 с.
 30. **Бошняк, Л. Л.** Измерения при теплотехнических исследованиях / Л.Л. Бошняк Л.: «Машиностроение», 1974. - 448 с.
 31. **Вискин, Ж. В.** Сжигание угля в кипящем слое и утилизация его отходов / Ж. В. Вискин, В. И. Шелудченко, В. В. Кравцов//. – Донецк : Новый мир, 1997. – 284 с.
 32. **Вороновский, Г. К.** Усовершенствование практики оперативного управления крупными теплофикационными системами в новых экономических условиях / Г. К. Вороновский – Х.: Изд-во «Харьков», 2002.— 240 с.
 33. **Вороновський, Г.К.** Автоматизоване оперативне управління централізованим теплопостачанням в умовах неповної інформації: автореф. дис. доктора технічних наук / Вороновський Г. К.; НТУ

- «Харківський політехнічний інститут». – Х., 2003. – 32 с.
34. **Гавриленко, Б.В.** Вибір критеріїв ефективного управління системою теплопостачання шахти / Б.В. Гавриленко, А.Е. Ткаченко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Випуск 12 (113), серія гірничо-електромеханічна. – Донецьк: ДонНТУ, 2006. – с.47 – 52
 35. **Гавриленко, Б.В.** Критерии автоматического управления комплексом теплоснабжения шахты с топками кипящего слоя / Б.В. Гавриленко, А.Е. Ткаченко // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-20: сб. трудов XX Междунар. Науч. Конф. В 10 т. Т.7. Секции 9, 13/ под общ. Ред.. В.С. Балакирева. – Ярославль: Мзд-во Ярос.гос. техн.. ун-та, 2007. – с. 291-293
 36. **Гавриленко, Б.В.** Критерии управления тепловой производительностью котлоагрегата с топкой кипящего слоя при рециркуляции дымовых газов / Б.В. Гавриленко, С.В. Неежмаков // Международная молодежная научная конференция «Севергеоэкотех-2004». Ч. 2.: Материалы конференции. 17-19 марта 2004 г. – Ухта: УГТУ, 2005 – 342 с.
 37. **Гавриленко, Б.В.** Критерії керування роботою шахтної системи теплопостачання в умовах змінних витрат теплоносія / Б.В. Гавриленко, А.Е. Ткаченко // Автоматизація технологічних об'єктів та процесів. Пошук молодих. Збірник наукових праць IV Міжнародної науково-технічної конференції аспірантів та студентів в м. Донецьку 11-14 травня 2004 р. – Донецьк, ДонНТУ, 2004. – с. 307-310
 38. **Гавриленко, Б.В.** Математическая модель топки кипящего слоя шахтного автономного воздухоподогревателя в нестационарных условиях / Б.В. Гавриленко, С.В. Неежмаков // Проблемы эксплуатации оборудования шахтных установок: сборник научных трудов. – 2005. – с. 297 – 304.
 39. **Гавриленко, Б.В.** Моделювання роботи системи автоматичного управління топкою низькотемпературного киплячого шару / Б.В. Гавриленко, А.Е. Ткаченко // Наукові праці Донецького національного

- технічного університету. Серія: «Гірничо-електромеханічна». Випуск 101. – Донецьк: ДонНТУ, 2005. – с.24 – 31.
40. **Гавриленко, Б.В.** Постановка задачі керування комплексом теплопостачання шахти з топками КШ / Б.В. Гавриленко, А.Е. Ткаченко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Гірничо-електромеханічна». Випуск 104. – Донецьк: ДонНТУ, 2006. – с.42 – 46
 41. **Гавриленко, Б.В.** Синтез математической модели топки кипящего слоя шахтного воздухоподогревателя при нестационарных условиях для задач автоматического управления / Б.В. Гавриленко, С.В. Неежмаков // Моделювання та інформаційні технології: Зб. наук. пр. — К.: ІПМЕ ім. Г.Є.Пухова НАН України, 2010. — Вип. 57. — С. 164-173.
 42. **Гавриленко, Б.В.** Синтез математичної моделі комплексу теплопостачання шахти з топками киплячого шару / Б.В. Гавриленко, А.Е. Ткаченко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Випуск 14 (127), серія гірничо-електромеханічна. – Донецьк ДВНЗ «ДонНТУ», 2007. – с.46 – 51
 43. **Гавриленко, Б.В.** Система автоматичного управління шахтними котельними установками в умовах змінних витрат енергоносія / Б.В. Гавриленко, А.Е. Ткаченко // Труды международной научно-технической конференции «Горная энергомеханика и автоматика», Т.2, Донецк: ДонНТУ, 2003. – С. 54-59
 44. **Гавриленко, Б.В.** Совершенствование системы автоматизированного управления топкой низкотемпературного кипящего слоя / Б.В. Гавриленко, С.В. Неежмаков // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Гірничо-електромеханічна». Випуск 104. - Донецьк: ДонНТУ, 2006.
 45. **Гавріленко, Б.В.** Критерії керування шахтною системою теплопостачання з топками НТКШ / Б.В. Гавриленко, Г.Є. Ткаченко // Наукові праці

- Донецького національного технічного університету. Серія: «Гірничо-електромеханічна». Випуск 83. – Донецьк: ДонНТУ, 2004. – с.58 – 63.
46. **Герасименко, И.Е.** «Справочник инженера по пуску, наладке и эксплуатации котельных установок» / И.Е. Герасименко. – Киев: «Техника», 1986 г.
 47. **ГОСТ 16350-80.** Климат СССР. Районирование и статистические параметры климатических факторов для технических целей.
 48. **Григорьев, В.А.** Промышленная теплоэнергетика и теплотехника: Справочник / В.А. Григорьев, В.М. Зорин // – 2-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
 49. **Громов, Н.К.** Городские теплофикационные системы/ Н.К. Громов. – М.: «Энергия», 1974. – 256 с.: ил.
 50. **Гусаченко, Л. К.** Моделирование процессов горения твердых топлив / Л. К. Гусаченко, В. Е. Зарко, В. Я. Зырянов, В. П. Бобрышев. – Новосибирск: Наука, 1985.
 51. **Гусев, Ю.Л.** Основы проектирования котельных установок (Учебное пособие) / Ю.Л. Гусев // 2-е изд. М., Строиздат, 1973. - 248 с.
 52. Датчики давления Метран. Каталог продукции. – Челябинск.: Метран, 2008.
 53. **Джонсон, Н.** Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы обработки данных / Н. Джонсон, Ф. Лион //- М.: Финансы и статистика, 1980. - 603 с.
 54. **Дилигенский, Н.В.** Нечеткое моделирование и многокритериальная оптимизация производственных систем в условиях неопределенности: технология, экономика, экология / Н.В. Дилигенский, Л.Г. Дымова, П.В. Севастьянов // М.: «Издательство Машиностроение-1», 2004, - с.397.
 55. **Долгий, В.Я.** Показатели качества углей, добытых на шахтах Украины / В.Я. Долгий, А.А. Кривченко, М.Д. Шамало, В.А. Долгая // Уголь Украины. – 1999. – август. – с. 18-22.

56. **Дроздов, В.Ф.** Отопление и вентиляция: Учеб.пособие для строит. вузов и фак. По спец. «Теплогазоснабжение и вентиляция». / В.Ф. Дроздов // В 2-х ч. Ч.1. Отопление. – М.: Высш. Шк., 1984. – 263 с., ил.
57. **Дубовой, В.М.** Контроль та керування в мережах теплопостачання. / В.М. Дубовой // Вінниця: УНІВЕРСУМ, 2005. - 190 с.
58. **Дубовой, В.М.** Математичне моделювання в задачах оцінювання поточного стану інженерних мереж теплопостачання / В.М. Дубовой, Ю.М. Паночишин // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2004ю - №6(76). – с. 131-139
59. **Дьяконов, В.П.** MATLAB. Анализ, идентификация и моделирование систем. Специальный справочник. / В. Дьяконов, В. Круглов // – СПб.: Питер, 2002. – 448 с.: ил.
60. **Дьяконов, В.П.** MATLAB. Полный самоучитель. / В.П. Дьяконов // М.: ДМК Пресс, 2012. – 768 с.: ил
61. **Дюскин, В.К.** Количественно-качественное регулирование тепловых сетей / В.К. Дюскин / - М. и Л.: Государственное энергетическое издательство, 1959. - 144 с.
62. **Ейтс, Дж.** Основы механики псевдоожижения с приложениями / Ейтс Дж. // Пер. с англ. — М.: Мир, 1986. - 288 с, ил.
63. **Жуков, Д.В.** Повышение эффективности работы систем централизованного теплоснабжения путем оптимизации теплогидравлических режимов [Электронный ресурс]/ Д. В. Жуков, В.З. Дмитриев// Эско. Электронный журнал энергосервисной компании «Экологические системы», 2012. – № 6. – Режим доступа: http://journal.esco.co.ua/2012_6/art124.htm. – (01.11.16).
64. **Забродский, С.С.** Гидродинамика и теплообмен в псевдоожиженном слое / Забродский С.С.// - М. и Л.: Государственное энергетическое издательство, 1963. - 488 с.
65. **Зингер, Н.М.** Гидравлические и тепловые режимы теплофикационных систем / Н.М. Зингер //- М.: Энергия, 1976, 336 с, ил

66. **Изерман, Р.** Цифровые системы управления: / Р. Изерман // Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 541 с., ил.
67. Инструкция по нормированию расхода тепловой энергии в угольной промышленности ВН 12.25.009№81 // Нормирование топливно#энергетических ресурсов и регулирование режимов электропотребления: сборник инструкций / под общ. ред. В. В. Дегтярева. – М.: Недра, 1983. – 22–26 с.
68. **Ионин, А.А.** Теплоснабжение: Учебник для вузов / А.А. Ионин, Б.М. Хлыбов, В.Н. Братенков, Е.Н. Терлецкая; под. Ред. А.А. Ионина. – М.: Стройиздат, 1982. – 336 с., ил.
69. **Канев, С.Н.** Учет количества теплоты и массы теплоносителя в водяных системах потребителей теплоснабжения /С.Н. Канев // Хабаровск.: Издательство: «Хабаровск» , 2005 г. – 133 с.
70. **Каневец, Г. Е.** Теплообменники и теплообменные системы / Г. Е. Каневец // Киев, Наук. думка, 1981.—272 с.
71. **Карасев, Н.И.** Руководство по техническому обслуживанию калориферных установок шахт / Н. И. Карасев, Б. Ф. Негруцкий, А.И. Григорьев и др; под ред. Н. И. Карасева. – М., Недра, 1984. 176 с.
72. **Кириянов, Д.В.** Mathcad 14 / Д.В.Кириянов. СПб.: БХВ-Петербург, 2007. — 685 с.
73. **Клюев, А.С.** Наладка средств автоматизации и автоматических систем регулирования: Справочное пособие / А.С. Клюев, А.Т. Лебедев, С.А. Клюев, А.Г. Товарнов; Под ред. А.С. Клеова. – 2-е изд., перераб и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 368с.: ил.
74. **Ковалко, М.П.** Енергосбереження – пріоритетний напрямок державної політики України / М.П. Ковалко, С.П. Денисюк // К.: Техніка 1998. – 726с.
75. **Козлова, І.Ю.** Підвищення ефективності теплопостачання спортивного комплексу НТУ «ХП» / І.Ю. Козлова, Л.І. Лисенко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х. : НТУ «ХП», 2013. – № 59 (1032). – С. 92–100. – Бібліогр.: 9 назв

76. **Корчевой, Ю.П.** Расчет выгорания частиц твердого топлива в кипящем слое с учетом внутривещного реагирования / Ю.П. Корчевой, В.П. Пацков, В.Б. Редькин, А.Ю. Майстренко // Тепломассообмен ММФ-92. Тепломассообмен в дисперсных системах: Т.5.-Минск. АНК"ИТМО им. А.В. Пылова", АНБ.-1992.-С. 168-170.
77. Котел КВКС-3. Паспорт. / Донецк: ПКБ «Донецкуглеавтоматика», 1987. – 13 с.
78. **Котыхов, В.Н.** Котельное оборудование для сжигания твердого топлива / В.Н. Котыхов // Энергосбережение. – 2000. – № 11. – С. 2-6.
79. **Кравцов, В.В.** Экономическое использование угля в теплоэнергетике / В.В. Кравцов, А.Г. Махмудов, А.В. Харченко // – Донецк: ДонГТУ, 1999. – 320 с.
80. **Кутний, Б.А.** Математична модель для регулювання відпуску теплоти в умовах нестационарного теплового режиму опалюваних будівель / Б.А. Кутний // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво) / Полт. держ. техн. ун-т ім. Ю. Кондратюка. – Полтава, 1998. – Вип. 2. – С.110–119.
81. **Кутний, Б.А.** Регулювання відпуску теплоти в централізованих системах теплогазопостачання в період “зрізки” температурного графіка / Б.А. Кутний // Автореф. дис. ... кандидата технічних наук/ Харківський державний технічний університет будівництва та архітектури. – Х., 1999, – 19 с.
82. **Кутний, Б.А.** Схемы автоматического регулирования отпуска теплоты на центральном тепловом пункте / Б.А. Кутний // Конструкции зданий и строительное производство: сб. науч. тр. Полт. инж.-строит. ин-т. – К., 1993. – С.155-160.
83. **Линевег, Ф.** Измерение температур в технике / Линевег Ф.// Справочник.- М.: 1980

84. **Лопатин, Б.В.** Тепловые сети. Строительные конструкции и расчет / Б.В. Лопатин. – М.: Государственное издательство лит-ры по строительству и архитектуре, 1954. - 252 с.
85. **Луканин, В.Н.** Теплотехника: Учеб. Для вузов / В.Н. Луканин, М.Г. Шатров, Г.М. Камфер и др.; под ред. В.Н. Луканина. – М.: Высш. Школа, 1999. – 671 с.: ил.
86. **Майстренко, А.Ю.** Горение и газификация высокочазных углей в кипящем слое / А.Ю. Майстренко // – Дисс. к-та техн. наук. – М./ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, 1991. – 270 с.; ил.
87. **Майстренко, А.Ю.** Кинетика взаимодействия коксов энергетических углей с газами-реагентами CO_2 и O_2 в кипящем слое под давлением / А.Ю. Майстренко // Экотехнологии и ресурсосбережение, 1997. № 2. - с. 3-9.
88. **Махорин, К.Е.** Сжигание топлива в псевдоожиженном слое / К.Е. Махорин, П.А. Хинкис // – К.: Наукова думка, 1989. – 204 с.
89. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 3-х т. Т.2: Синтез регуляторов и теория оптимизации систем автоматического управления / Под ред. Н.Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. – 736 с.; ил.
90. **Неежмаков, С.В.** Динамические характеристики средств контроля температуры кипящего слоя / С.В. Неежмаков, Б.В. Гавриленко // Автоматизація технологічних об'єктів та процесів. Пошук молодих. Збірник наукових праць. IV Міжнародна науково-технічна конференція аспірантів і студентів в м. Донецьку 11-14 травня 2004 р.
91. **Николаев, Ю.Е.** Повышение эффективности систем теплоснабжения промышленных предприятий / Ю.Е. Николаев // Промышленная энергетика. – 2005. - № 1. – с. 7-9.
92. **Орлов, М.Е.** Повышение эффективности систем теплоснабжения городов / М.Е. Орлов // СОК, 2014. – № 1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

<http://www.c-o-k.ru/articles/povyshenieeffektivnosti-sistem-teplosnabzheniya-gorodov> (дата обращения: 01.11.16)..

93. **Паночишин, Ю.М.** Моделювання систем керування потокорозподілом в мережах теплопостачання / Ю.М. Паночишин // Автореф. дис. ... кандидата технічних наук/ Вінницький національний технічний університет. – В., 2004, - 19 с.
94. **Паночишин, Ю.М.** Оптимізація контролю в системах управління інженерними мережами теплопостачання / Ю.М. Паночишин // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2003. - №6. – с.77-83
95. **Паночишин, Ю.Н.** Автоматизация управления распределением ресурсов в инженерных сетях / Ю.Н. Паночишин // Збірник наукових праць І Всеукраїнської науково-технічної конференції аспірантів та студентів «Автоматизація технологічних об'єктів та процесів. Пошук молодих». – Донецьк: ДонНТУ, 2001. – с.160 - 162.
96. **Пешехонов, Н.И.** Проектирование теплоснабжения / Н.И. Пешехонов. - Киев: Вища школа. Главное изд-во, 1982. – 328 с.
97. **Полушкин, В. И.** Отопление: учебник для студ. учреждений высш. проф. образования / В.И. Полушкин, С.М. Анисимов, В.Ф. Васильев, А.Ф. Смирнов, И.И. Суханова. – М.: Издательский центр «Академия».– 2010. – 256 с.
98. **Попырин, Л.С.** Математическое моделирование и оптимизация теплоэнергетических установок / Л.С. Попырин // М.: Энергия, 1978.
99. **Попырин, Л.С.** Исследование систем теплоснабжения / Л.С Попырин, К.С. Светлов, Т.М. Беляева и др.// М.: Наука, 1989. - 215 с.
100. Правила безпеки у вугільних шахтах: ДНАОП 1.1.30-1.01-00: Затв. Міністерством праці та соц. політики України 22.08.00 / Держ. департамент з нагляду за охороною праці; Ред. коміс.: С.О. Сторчак (голова) та ін. — К.: Держнагляд охорони праці, 2001. — 496с. : табл.
101. Приборы регулирующие Р.25. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – М.: Завод тепловой автоматики, 1985.

102. Проведение поверочных расчетов теплоснабжения поверхностного комплекса шахты «Южнодонбасская № 1»: Отчет о договорной работе / НИИ Горной Механики им. М. М. Федорова; Руководитель Е.П. Король. – Донецк [Б. и.], 1993. – 63 с.
103. Протокол совместного заседания секции машиностроения, технического обслуживания ремонта горношахтного оборудования научно-технического совета Минуглепрома Украины и экспертно-консультативной группы при Министре – Донецк. 14 сентября 1999 г.
104. Расходомеры. Счетчики Метран. Каталог продукции. – Челябинск.: Метран, 2008.
105. Расчеты аппаратов кипящего слоя: Справочник / Под ред. И.П. Мухленова, Б.С. Сажина, В.Ф. Фролова. – Л.: Химия, 1986. – 352 с.
106. Регуляторы ТРМ. Каталог продукции. – М.: ОВЕН, 2005.
107. **Роддатис, К. Ф.** Справочник по котельным установкам малой производительности / К. Ф. Роддатис, А. Н. Полтарецкий; под ред. К.Ф. Роддатиса.— М.: Энергоатомиздат, 1989. — 488 с.: ил.
108. **Ротач, В.Я.** Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами: Учебник для вузов / В.Я. Ротач – М.: Энергоатомиздат. 1985. – 296 с., ил.
109. Руководство по проектированию угольных шахт: Государственный нормативный акт об охране труда. – К.: Основа, 1994. – 312 с. – (Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт. Государственный нормативный акт об охране труда)..
110. **Рымкевич, А. А.** Управление системами кондиционирования воздуха / А.А. Рымкевич, М.Б. Халамейзе - М.: «Машиностроение», 1977. - 274 с.
111. **Сергиенко, А. Б.** Цифровая обработка сигналов / А. Б. Сергиенко – СПб.: Питер, 2003. – 608 с.: ил.
112. **Сидельковский, Л.Н.** Котельные установки промышленных предприятий: Учебник для вузов / Л.Н. Сидельковский, В.Н. Юренев – 3-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 528 с.: ил.

113. **Смаль, В.** Остановлена добыча угля // Донецкие новости, № 4, 26 января – 1 февраля 2006 г.
114. **Соколов, Е.Я.** Теплофикация и тепловые сети / Е.Я. Соколов - М.: МЭИ, 2006. – 472 с.
115. **Солдатенков, А.С.** Математическое моделирование системы управления теплопотреблением комплекса зданий: монография. / А.С. Солдатенков. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2015. – 176 с.
116. **Сотников, А.Г.** Автоматизация систем кондиционирования воздуха и вентиляции / А.Г. Сотников– Л.: Машиностроение, 1984. -240 с.
117. **Софиев, А.Э.** Системы математического моделирования теплогидравлических сетей / А.Э. Софиев, В.А. Иванов, А.П. Иванов Теплоэнергетика. – 2002. - № 19. – с.35-39.
118. Строительные нормы и правила: СНиП 23-01-99. Строительная климатология и геофизика [Изменение. № 1, принятое постановлением Госстроя России от 24 декабря 2002 г. № 164 и введенное в действие с 1 января 2003 г.]. – М.: [б.и.], 2003. – 108 с.
119. Строительные нормы и правила: СНиП II-35-76* Котельные установки (с Изменением) [Изменение 1, утвержденное постановлением Госстроя России от 11.09.97 N 18-52 (введено в действие с 01.01.98)]. – М.: [б.и.], 2003. – 1110 с.
120. Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод) /Под ред. Н. В. Кузнецова, В. В. Митора, И. Е. Дубовского, Э. С. Карасиной. М.: Энергия, 1973. - 296 с.
121. Технический отчет по режимно-наладочным испытаниям водогрейного котла № 1 ВК-2 с топкой НТКС в котельной шахты «Кураховская»: Технический отчет / ГОАО «АСУ углеавтоматика»; Руководитель Н.Н. Ефименко. – Донецк: [Б. и.], 2004. – 23 с.
122. **Ткаченко, А.Е.** Математическое моделирование энергообмена в шахтном комплексе теплоснабжения с топками низкотемпературного кипящего слоя / А.Е. Ткаченко // Вестник Донбасской национальной академии

- строительства и архитектуры. Инженерные системы и техногенная безопасность. Сборник научных трудов. Выпуск 2016-5 (121). – Макеевка, ДонНАСА, 2016. – С. 42-49.
123. **Ткаченко, А.Е.** Моделирование системы автоматического управления топкой низкотемпературного кипящего слоя / А.Е. Ткаченко // Международная молодежная научная конференция «Севергеоэкотех-2005», Ч. I.: Материалы конференции. 23-25 марта 2005 г. – Ухта: УГТУ, 2005. – с.62-67
124. **Ткаченко, А.Е.** Обоснование критерия управления рациональным режимом работы группы котлоагрегатов низкотемпературного кипящего слоя / А.Е. Ткаченко // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. Сборник научных трудов по материалам международной заочной научно-практической конференции 2015 г., № 7, часть 3 (18-3). – Воронеж, ФГБОУ ВО «ВГЛУ», С.58-61
125. **Ткаченко, А.Е.** Разработка требований к системе управления комплексом теплоснабжения шахты с топками кипящего слоя / А.Е. Ткаченко // Международная молодежная научная конференция «Севергеоэкотех-2007», Ч. I.: Материалы конференции. 23-25 марта 2005 г. – Ухта: УГТУ, 2005. – с.62-67
126. **Ткаченко, А.Е.** Синтез динамической модели котельного агрегата низкотемпературного кипящего слоя / А.Е. Ткаченко, Б.В. Гавриленко // Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых: Сборник научных трудов XV научно-технической конференции аспирантов и студентов в г. Донецке, 20-22 мая 2015. – Донецк: ДонНТУ, 2015. – С. 195-198.
127. **Ткаченко, А.Е.** Особенности системы автоматического управления шахтными котельными установками / А.Е. Ткаченко, О.В. Токарев // XVI Международная молодежная конференция «Севергеоэкотех-2015»: Материалы конференции (25-27 марта 2015). В 6 ч. Ч.1. – Ухта: УГТУ, 2015. – С. 92–93.

128. **Токарев, О.В.** Критерии оптимальной совокупной работы топок низкотемпературного кипящего слоя на тепловую сеть / О.В. Токарев, А.Е. Ткаченко // Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых. Сборник научных трудов XV научно-технической конференции аспирантов и студентов в г. Донецке 20-22 мая 2015 г. - Донецк, ДонНТУ, 2015, С. 199-202
129. **Ткаченко, Г.Є.** Критерії оптимального управління роботою топок НТКШ при їх сумісній роботі на теплову мережу / Г.Є. Ткаченко, // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. – Мелітополь: ТДАТУ, 2008. – Вип. 8. Т. 10. – С. 124–128.
130. **Трембовля, В.И.** Теплотехнические испытания котельных установок / В.И. Трембовля, Е.Д. Фингер, А.А. Авдеева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 416 с.: ил.
131. ТРМ101. Измеритель-регулятор микропроцессорный. Руководство по эксплуатации. – М.: ОВЕН, 2005. – 98 с.
132. **Файерштейн** и др. Справочник по автоматизации котельных. –М.: Энергоатомиздат, 1985.– 196 с.
133. **Федоров, А.П.** Выбор оптимальных величин режимных характеристик магистрального теплопровода / А.П. Федоров // Коммунальное хозяйство городов: Респ. Межвед. Научн.-тех.сб.-К.: Техника.- № 18, 1999. с.133-137.
134. **Федоров, О.П.** Рациональні режими відпуску теплоти при різних схемах теплопостачання / О.П. Федоров // Автореф. дис. кандидата технічних наук/ Харківський державний технічний університет будівництва та архітектури. – Х., 2000, - 18 с.
135. **Хобта, В.М.** Управление инвестициями = Хобта, В. М. Управління інвестиціями: учебное пособие. / В. М. Хобта. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 394 с.
136. **Чистяков, В. С.** Краткий справочник по теплотехническим измерениям / В. С.Чистяков. - М.: Энергоатомиздат, 1990. — 320 с

137. **Шалагинова, З.И.** Задачи и методы расчета температурных графиков отпуска тепла на основе теплогидравлического моделирования систем теплоснабжения / З.И. Шалагинова // Теплоэнергетика. – 2004. - №7. – с.41-49.
138. **Шишов, Е.Л.** Типовые проекты организации скоростного строительства шахт производительностью 600 и 1 200 тыс. т. угля в год / Е. Л. Шишов, К.И. Смирнов. – Харьков: [б. и.], 1958. – 15 с., 1 л. граф.: схем.; 22 см. – (Информационное сообщение/ Гос. план. комис. Совета Министров УССР. Всесоюз. науч.-исслед. ин-т организации и механизации шахтного строительства ВНИИОМШС; № 110).

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ПБ – правила безопасности;

АБК – административно-бытовой комбинат;

КПД – коэффициент полезного действия;

НТКС (КС) – низкотемпературный кипящий слой;

КУ – калориферная установка;

ПН – поверхности нагрева;

ППН – погружные поверхности нагрева;

ЭПН – экранные поверхности нагрева;

КПН – конвективные поверхности нагрева;

ЭК – экономайзер;

САУ – система автоматического управления;

g_{tn} – расход теплоносителя (воды) в системе теплоснабжения шахты, $\text{м}^3/\text{с}$;

m – количество котлоагрегатов в сети теплоснабжения, шт;

n – количество тепловых абонентов, шт;

$Q_{k.a.}$ – теплота, производимая одним котлоагрегатом с НТКС, Дж;

Q_a – теплота, потребляемая одним абонентом, Дж;

Q_{ot} – теплота, потребляемая шахтными абонентами на отопление, Дж;

Q_{vent} – теплота, потребляемая шахтными абонентами на вентиляцию, Дж;

Q_{gvs} – теплота, потребляемая шахтой на горячее водоснабжение, Дж;

Q_{kal} – теплота, потребляемое калориферной установкой, Дж;

$Q_{pot.tr}$ – потери теплоты в сети при его транспортировании к абонентам, Дж;

Q_{pot} – общие потери теплоты в котлоагрегатах при его производстве, Дж;

δ_{ot} – удельная отопительная характеристика здания, $\text{Вт}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$;

δ_{vent} – удельная вентиляционная характеристика здания, $\text{МВт}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$;

t_{vn} – температура наружного воздуха, $^\circ\text{C}$;

g_{kal} – нормативный расход вентиляционного воздуха через шахту, $\text{м}^3/\text{с}$;

k – количество циркуляционных насосов в системе, шт;

q_n – расход воды, обеспечиваемый одним циркуляционным насосом, $\text{м}^3/\text{с}$;

t_{pom}^n – нормируемая температура внутри шахтных зданий, $^{\circ}\text{C}$;

K – коэффициент влияния скорости ветра, безразм. величина;

V_{zd} – кубатура (объем) здания по внешнему обмеру, м^3 ;

τ – время, ч или с;

N – списочный состав трудящихся шахты, чел;

Q_{pol} – теплота, полезно вносимая котлоагрегатом, Дж;

B – массовый расход твердого топлива, $\text{м}^3/\text{с}$;

V_{dv} – расход дутьевого воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$;

k_{ks} – коэффициента погружения ППН в слой, %;

$G_{k.a}$ – нагрузка по водопроизводительности одного котлоагрегата, $\text{кг}/\text{с}$;

q – расход теплоносителя (воды), $\text{м}^3/\text{с}$;

$\eta_{k.a}$ – КПД котлоагрегата с НТКС, %;

g_{gvs} – расход воды на горячее водоснабжение, $\text{кг}/\text{с}$;

c_v – теплоемкость воды, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$;

G – массовый расход теплоносителя в системе, $\text{кг}/\text{с}$;

t_v^n – температура воды на входе к потребителям, $^{\circ}\text{C}$;

t_v^o – температура обратной воды на входе в циркуляционную систему, $^{\circ}\text{C}$;

t_v^s – средняя температура теплоносителя (воды) в тепловой сети, $^{\circ}\text{C}$;

k_b – коэффициент теплообмена материала теплообменника бойлера, $\text{Дж}/(\text{K}\cdot\text{м}^2)$;

k_{kal} – коэффициент теплообмена калориферной установки, $\text{Дж}/(\text{K}\cdot\text{м}^2)$;

k_{op} – коэффициент теплообмена около внутренней стенки эквивалентного обогревательного прибора, $\text{Дж}/(\text{K}\cdot\text{м}^2)$;

F_b – площадь поверхности теплообменника бойлера, м^2 ;

F_{kal} – площадь поверхности теплообмена калориферной установки, м^2 ;

F_{op} – площадь внутренней поверхности обогревательного прибора, м^2 ;

t_b – температура теплообменника бойлера, $^{\circ}\text{C}$;

t_b – температура теплообменника бойлера, $^{\circ}\text{C}$;

t_{kal} – температура теплообменника калориферной установки, $^{\circ}\text{C}$;

- t_{op} – температура внутренней стенки обогревательного прибора, $^{\circ}\text{C}$;
- m_{gvs} – масса воды в бойлере горячего водоснабжения, кг;
- t_{gvs} – температура воды в бойлере горячего водоснабжения, $^{\circ}\text{C}$;
- c_{vz} – теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К);
- c_{kal} – удельная теплоемкость теплообменника калориферной установки, Дж/(кг·К);
- m_{kal} – масса теплообменника калориферной установки, кг;
- F_{op}^{vn} – площадь внешней поверхности обогревательного прибора, м^2 ;
- c_{op} – удельная теплоемкость стенки эквивалентного обогревательного прибора, Дж/(кг·К);
- m_{op} – масса стенки эквивалентного обогревательного прибора, кг;
- k_{op}^k – коэффициент конвективного теплообмена около внешней поверхности эквивалентного обогревательного прибора, Дж/(К· м^2);
- k_{op}^l – коэффициент лучевого теплообмена около внешней поверхности эквивалентного обогревательного прибора, Дж/(К 4 · м^2);
- t_{pom} – температура внутреннего воздуха в здании, $^{\circ}\text{C}$;
- t_{sr} – среднерадиационная температура поверхностей, окружающих данную, $^{\circ}\text{C}$;
- m_{pom} – масса воздуха в помещении, кг;
- k_{vo}^k – коэффициент конвективного теплообмена на внутренних поверхностях ограждающих конструкций, Дж/(К· м^2);
- F_{zk} , F_{vk} , F_{mk} – площади соответственно внешних, внутренних ограждений и малотеплоемких ограждающих конструкций, м^2 ;
- t_{zk} , t_{vk} , t_{mk} – температуры на внутренних поверхностях соответственно внешних, внутренних и малотеплоемких ограждающих конструкций, $^{\circ}\text{C}$;
- g_{vent} – средний расход воздуха на вентиляцию шахтных зданий, $\text{м}^3/\text{с}$;
- ρ_{vz} – плотность воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$;
- t_{ks} – температура слоя, $^{\circ}\text{C}$;
- c_{ks} – теплоемкость материала НТКС, Дж/(кг·К);

ρ_{ks} – насыпная плотность материала НТКС, кг/м³;

S – площадь зеркала горения, м²;

H – высота слоя, м;

t_{dv} – температура дутьевого воздуха, °С;

Q_n^p – низшая теплота сгорания твердого топлива, Дж/кг;

B_s – расход топлива на 1 м² площади зеркала горения, кг/(м²·с);

v_{dv} – скорость дутьевого воздуха через слой, м³/с;

q_3, q_4 – доля соответственно химического и механического недожогов, %;

q_z – потери теплоты слоем с отводимой золой, Дж/с.

q_L – потери теплоты слоем с излучением, Дж/с.

Q_{ugol} – теплота, вносимая в топку при сгорании 1 кг угля, Дж/кг;

Q_{dv} – теплота, вносимая с дутьевым воздухом на 1 кг сжигаемого угля, Дж/кг.

$Q_{h.n.}$ – химический недожог угля на 1 кг сжигаемого топлива, Дж/кг;

$Q_{f.n.}$ – физический недожог угля на 1 кг сжигаемого топлива, Дж/кг;

$Q_{f.sh}$ – унос теплоты вместе с физической теплотой шлаков, Дж/кг;

Q_{ppn}^{ks} – теплота, воспринятая погружными поверхностями нагрева ППН на 1 кг сжигаемого топлива, Дж/кг;

Q_{atm} – теплота, теряемая в атмосферу на 1 кг сжигаемого топлива, Дж/кг;

$Q_{is.vz}$ – теплота, уносимая исходящим воздухом на 1 кг сжигаемого топлива, Дж/кг,

$Q_{p.sg}$ – теплота, уносимая продуктами сгорания на 1 кг сжигаемого топлива, Дж/кг;

Q_{oh} – теплота, теряемая на внешнее охлаждение и в циркуляционной системе котлоагрегата на 1 кг сжигаемого топлива, Дж/кг;

Q_{ppn}^{ug} – теплота, которая полезно воспринимается на нагрев теплоносителя в выведенной из слоя части ППН на 1 кг сжигаемого топлива, Дж/кг;

Q_{epn} – теплота, которая полезно воспринимается на нагрев теплоносителя в ЭПН на 1 кг сжигаемого топлива, Дж/кг;

Q_{ek} – теплота, которая полезно воспринимается на нагрев теплоносителя в экономайзере на 1 кг сжигаемого топлива, Дж/кг;

$Q_{vz,p}$ – теплота, которая полезно воспринимается на нагрев дутьевого воздуха в воздухоподогревателе на 1 кг сжигаемого топлива, Дж/кг;

m_{ks} – масса НТКС, кг;

m_{ugol} – расход угля, вносимого в слой, кг/с;

$m_{d,v}$ – массовый расход дутьевого воздуха, вносимого в слой, кг/с;

m_{zoli} – расход золы, удаляемой из слоя, кг/с;

$m_{p.sg}$ – массовый расход продуктов сгорания, выносимых из слоя, кг/с;

$m_{is.vz}$ – массовый расход исходящего из слоя дутьевого воздуха, кг/с;

F_{ppn} – площадь теплообмена ППН, м²;

k_{ppn}^{ks} – коэффициент конвективного теплообмена НТКС с ППН, Дж/(м²·К);

α_{ppn}^{ks} – коэффициент лучевого теплообмена НТКС с ППН, Дж/(м²·К⁴);

k_{ppn}^{ug} – коэффициент конвективного теплообмена уходящих газов с ППН, Дж/(м²·К);

α_{ppn}^{ug} – коэффициент лучевого теплообмена уходящих газов с ППН, Дж/(м²·К⁴);

k_{epn}^{ug} – коэффициент конвективного теплообмена уходящих газов с ЭПН, Дж/(м²·К);

α_{epn}^{ug} – коэффициент лучевого теплообмена уходящих газов с ЭПН, Дж/(м²·К⁴);

F_{epn} – площадь теплообмена ЭПН, м²;

t_{epn}^v – средняя температура воды в ЭПН, °С.

k_{kpn}^{ug} – коэффициент конвективного теплообмена КПН с уходящими газами, Дж/(м²·К);

F_{kpn} – площадь теплообмена КПН, м²;

t_{kpn}^v – средняя температура воды в конвективных поверхностях нагрева, °С;

t_{kpn}^{ug} – средняя температура уходящих газов на КПН, °С;

k_{ek} – коэффициент конвективного теплообмена экономайзера с уходящими газами, Дж/(м²·К);

F_{ek} – площадь теплообмена экономайзера, м²;

Δt_{ek} – изменение температуры воды в экономайзере, °С;

t_{ug} – температура уходящих газов, °С;

I_{ks} – энтальпия кипящего слоя, Дж/кг;

I_{dv} – энтальпия дутьевого воздуха, Дж/кг;

$I_{is.vz}$ – энтальпия исходящего воздуха, Дж/кг;

c_z – теплоемкость золы, Дж/(кг·К);

t_z – температура золы, перед ее удалением из слоя, °С;

$I_{p.sg}$ – энтальпия продуктов горения, Дж/кг;

$k_{h.n.}$ – коэффициент химического недожога для НТКС, %.

Q_{tt} – количества теплоты, производимого топкой НТКС по каналу управления ее производительностью, Вт;

K_{tt} – передаточный коэффициент по каналу «объемный расход твердого топлива – производительность топки», Дж/(м³·с);

T_{tt} – постоянная времени по каналу «объемный расход твердого топлива – производительность топки», с;

τ_{tt} – время запаздывания по каналу «объемный расход твердого топлива – производительность топки», с;

v_v – минимальный объем воздуха, требуемый на 1 кг топлива, м³/кг.

K_{sl} – передаточный коэффициент по каналу «внесенная теплота – температура НТКС», К/Дж;

V_{tt} – объемный расход твердого топлива, м³/с;

v_d – объем продуктов сгорания, получаемый на 1 кг топлива, м³/кг;

T_{sl} – постоянная времени по каналу «внесенная теплота – температура КС», с;

I_{ug} – удельная объемная энтальпия уходящих газов, Дж/м³;

V_{ug} – объем уходящих дымовых газов, м³;

I_{dv}^v – объемная энтальпия воздуха, Дж/м³;

$I'_{p.sg}$ – объемная энтальпия продуктов сгорания, Дж/м³;

α – коэффициент избытка воздуха, безразмерная величина;

I_{gm} – энтальпия продуктов сгорания на 1 кг твердого топлива при $\alpha=1$, Дж/кг;

I_z – энтальпия одного килограмма золы, Дж/кг;

W_p, A_p – рабочие влажность, %, и зольность угля, %, соответственно;

K_{vt} – передаточный коэффициент по каналу «расход дутьевого воздуха – количество теплоты, уносимой из слоя», Дж/м³;

$Q'_{ks}(V_{tt})$ – количество теплоты вносимой в слой от сгорания топлива в единицу времени, Вт;

$Q''_{ks}(V_{dv})$ – количество теплоты отводимой из слоя с дутьевым воздухом в единицу времени, Вт;

Q_{ks} – общее количество теплоты получаемой КС в единицу времени, Вт;

$Q_{ppn}^{ks.k}$ – количество воспринимаемой ППН теплоты при конвективном теплообмене НТКС с погруженной частью ППН в единицу времени, Вт;

$Q_{ppn}^{ks.l}$ – количество воспринимаемой ППН теплоты при лучевом теплообмене НТКС с погруженной частью ППН в единицу времени, Вт;

$Q_{ppn}^{ug.k}$ – количество воспринимаемой ППН теплоты при конвективном теплообмене НТКС с непогруженной частью ППН в единицу времени, Вт;

$Q_{ppn}^{ug.l}$ – количество воспринимаемой ППН теплоты при лучевом теплообмене НТКС с непогруженной частью ППН в единицу времени, Вт;

$Q_{k.a.}^{ug}$ – теплота воспринимаемая уходящими газами в единицу времени, Вт;

Q_{epn}^k – количество воспринимаемой ЭПН теплоты при конвективном теплообмене с уходящими газами в единицу времени, Вт;

Q_{epn}^l – количество воспринимаемой ЭПН теплоты при лучевом теплообмене с уходящими газами в единицу времени, Вт;

$Q'_{p.sg}$ – теплота, уносимая из слоя с продуктами сгорания до теплообмена с поверхностями нагрева, Дж/кг;

$Q'_{is.vz}$ – теплота, уносимая из слоя с исходящим воздухом до теплообмена с поверхностями нагрева, Дж/кг;

$B_i^{isl} (Q_{k.a.i})$ – расход условного топлива, кг/с;

$B_i (Q_{k.a.i})$ – суммарный расход натурального топлива, кг/с;

E – топливный эквивалент, безразм.величина;

$\Delta\tau_{pp}$ – время переходного процесса i -го котлоагрегата, с;

$\Delta\tau_{ust}$ – время уставки переходного процесса i -го котлоагрегата, с;

$\Delta\tau_{pogr}^{dop}$ – допустимая погрешность переходного процесса i -го котлоагрегата, с;

Q_{ust} – уставка суммарной производительности группы котлоагрегатов, Дж/кг;

Q_{ft}^p – теплота, внесенная в топку с физической теплотой топлива, Дж/кг;

Q_{dv}^p – теплота, внесенная в топку с дутьевым воздухом, Дж/кг;

t_{dv} – температура дутьевого воздуха, °С;

I_{dv} – удельная энтальпия дутьевого воздуха, Дж/кг;

$Q'_{p.sg}$ – теплота, уносимая из слоя с продуктами сгорания до теплообмена с поверхностями нагрева, Дж/кг;

$Q'_{is.vz}$ – теплота, уносимая из слоя с исходящим воздухом до теплообмена с поверхностями нагрева, Дж/кг;

Q_F – удельная потеря теплоты с поверхности охлаждения Дж/(м²·с);

F_{oh} – поверхность охлаждения по наружному обмеру, м²;

$Q_{tp.k}$ – потеря теплоты трубопровода котла, Дж/с;

a^i – коэффициент полинома функциональной зависимости КПД от текущей производительности котлоагрегатов, %/Вт;

eps – точность вычислений алгоритма расчета искомой производительности котлоагрегатов, безразм.величина;

ε – параметр, определяющий уменьшение интервала поиска алгоритма расчета искомой производительности котлоагрегатов, безразм.величина;

z_i – диапазон варьирования неизвестных алгоритма расчета искомой производительности котлоагрегатов, безразм.величина.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Параметры математической модели котлоагрегата с НТКС

Характеристики топлива

Вид: промышленный продукт мокрого обогащения;

Низшая рабочая теплота сгорания $Q_n^P = 17991$ кДж/кг;

Рабочая влажность $Wp = 9$ %;

Рабочая зольность $Ap = 35,5$ %;

Требуемый объем воздуха на один кг топлива $v_v = 4.77$ м³/кг;

Объем продуктов сгорания на один кг топлива $v_g = 5.16$ м³/кг;

Массив возможных температур для задания массивов энтальпий воздуха и продуктов сгорания, $t = -100:100:1500$ °С:

Таблица А.1 – Массив объемных энтальпий воздуха $I_{dv}^v = f(t)$, кДж/м³

$t, ^\circ\text{C}$	-100	0	100	200	300	400	500	600
$I_{dv}^v, \text{кДж/м}^3$	-125.52	0	132.21	266	402.5	541.4	683.7	829.3

700 °С	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500
979	1129.7	1280.3	1435	1594	1753	1912	2075.3	2238.4

Таблица А.2 – Массив энтальпий продуктов сгорания, $I_{p.sg}^v = f(t)$ кДж/м³;

$t, ^\circ\text{C}$	-100	0	100	200	300	400	500	600
$I_{psg}^v, \text{кДж/м}^3$	-137	0	138.7	280.6	426.5	576.5	731.4	888.7

700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500
1050.9	1217.9	1388.2	1560.1	1733.6	1907	2085.5	2267	2447

Исходные значения технологических параметров при моделировании:

Температура кипящего слоя: $T_{ks}^0 = 750$ °С;

Расход твердого топлива: $V_{\pi}^0 = 0,00008$ м³/с;

Расход дутьевого воздуха: $V_{d.vozd}^0 = 1 \text{ м}^3/\text{с};$

Технологические ограничения по условиям существования КС:

Температура кипящего слоя: $750 \text{ }^{\circ}\text{C} \leq t_{ks} \leq 950 \text{ }^{\circ}\text{C};$

Скорость дутьевого воздуха: $0,5 \text{ м/с} \leq \omega_v \leq 2,5 \text{ м/с};$

Граничные значения управляющих воздействий:

Объемный расход твердого топлива $V_{tt} = 0 \dots 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с};$

Объемного расхода дутьевого воздуха: $V_{dt} = 0 \dots 5 \text{ м}^3/\text{с};$

Коэффициент погружения ППН в слой $k_{ks} = 0 \dots 1;$

Характеристика котлоагрегата

Тип котлоагрегата: КВКС-3,489

Номинальная мощность: $Q_{pol}^n = 3,489 \text{ MBm}$

Площади поверхностей нагрева:

ППН – $F_{ppn} = 2,11 \text{ м}^2;$

ЭПН – $F_{epn} = 9 \text{ м}^2;$

КПН – $F_{kpn} = 129 \text{ м}^2;$

ЭК – $F_{ek} = 100 \text{ м}^2;$

$G = 33 \text{ кг/с}$ – массовый расход воды в системе;

t_v^n – температура нагретой воды, которая поступает потребителям, $^{\circ}\text{C};$

$t_v^o = 70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ – температура холодной воды на входе в циркуляционную систему котла;

Физические константы и коэффициенты теплообмена:

$c_v = 4187 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}$ – теплоемкость воды;

$\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{K}^4)$ — коэффициент излучения абсолютно черного тела

$k_{ppn}^{ks} = 500 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{K)}$ – коэффициент конвективного теплообмена НТКС с ППН;

$\alpha_{ppn}^{ks} = 343 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{K)}$ - коэффициент лучевого теплообмена НТКС с ППН;

$k_{ppn}^{ug} = 48 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{K)}$ – коэффициент конвективного теплообмена уходящих газов с ППН и ЭПН;

$\alpha_{ppn}^{ug} = 0,6 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К}^4)$ – коэффициент лучевого теплообмена уходящих газов с ППН, ЭПН, КПН и ЭК.

Характеристики передаточных функций звеньев модели котлоагрегата с НТКС:

1) Передаточная функция по каналу «изменение объемного расхода твердого топлива V_{tt} - тепло, полученное топкой от сгорания топлива Q_{tt} »:

$$W(p)_{V_{tt}-Q_{tt}} = \frac{K_{tt}}{p \cdot T_{tt} + 1} \cdot e^{-p\tau_{tt}} \quad (2.12)$$

где $K_{tt} = 16,2 \text{ МДж/(м}^3\cdot\text{с)}$ – передаточный коэффициент по каналу «объемный расход твердого топлива – изменение производительности топки»;

$T_{tt} = 100 \text{ с}$ – постоянная времени;

$\tau_{tt} = 50 \text{ с}$ - время запаздывания, с.

2) Передаточная функция по каналу «объемный расход дутьевого воздуха V_{dv} - изменение производительности топки Q_{tt} »:

$$W_{V_{dv}-Q_{tt}}(p) = -K_{VT} = -980 \text{ Дж/(м}^3\cdot\text{с)}$$

3) Передаточная функция по каналу «изменение объемного расхода твердого топлива V_{tt} – объем прореагировавшего воздуха $V_{pr.vz}$ »:

$$W_{V_{tt}-V_{pr.vz}}(p) = -\frac{\frac{K_{tt}}{Q_n^p} \cdot v_v}{T_{tt} \cdot p + 1} \cdot e^{-\tau_{tt} \cdot p},$$

где $\frac{K_{tt}}{Q_n^p} \cdot v_v = 4292$, безразм. величина - передаточный коэффициент по каналу «объемный расход твердого топлива – количество прореагировавшего воздуха»;

4) Передаточная функция по каналу «изменение объемного расхода твердого топлива V_{tt} – объем продуктов сгорания $V_{p.sg}$ »:

$$W_{V_{tt}-V_{p.sg}}(p) = -\frac{\frac{K_{tt}}{Q_n} \cdot v_d}{T_{tt} \cdot p + 1} \cdot e^{-\tau_{tt} \cdot p},$$

где $\frac{K_{tt}}{Q_n} \cdot v_d = 4643$, безразм. величина – передаточный коэффициент по каналу «объемный расход твердого топлива – количество продуктов сгорания»;

5) Передаточная функция по каналу «объем дымовых газов V_{ug} – объем дутьевого воздуха V_{dv} »:

$$V_{ug} = V_{dv} - V_{pr.vz} + V_{p.sg}.$$

6) Передаточная функция по каналу «изменение аккумулированной НТКС теплоты Q_{tt} – температура НТКС t_{ks} »:

$$W_{Q_{tt}-t_{ks}}(p) = \frac{K_{sl}}{T_{sl} \cdot p + 1},$$

где $K_{sl} = 0,61 \text{ } ^\circ\text{C/Дж}$ – передаточный коэффициент по каналу «внесенная теплота – температура НТКС»;

$T_{sl} = 610 \text{ с}$ – постоянная времени по данному каналу.

7) Передаточная функция по каналу «тепло, уносимое из слоя дымовыми газам $Q_{k.a.}$ как функция от температуры НТКС t_{ks} и объема V_{ug} уходящих дымовых газов»:

$$W(p)_{Q_{k.a.}-t_{ks};V_{ug}} = f(t_{ks};V_{ug});$$

Представлена в табличном виде на основании зависимости $Q_{k.a.}(t_{ks}) = I_{ug}(t_{ks}) \cdot V_{ug}$. Данные для расчета даны в табл. А.1 и А.2.

Многопараметрические передаточные функции:

- 1) Передаточная функция по каналу «температура НТКС t_{ks} – теплота, переданная конвективным теплообменом погруженной части ППН $Q_{ppn}^{ks.k}$ »

$$W_{ppn}^{ks.k}(p) = f(t_{ks}; t_v^{ek}; k_{ppn}^{ks});$$

- 2) Передаточная функция по каналу «температура НТКС t_{ks} – теплота, переданная лучевым теплообменом погруженной части ППН $Q_{ppn}^{ks.l}$ »

$$W_{ppn}^{ks.l}(p) = f(t_{ks}; t_v^{ek}; k_{ppn}^{ks});$$

- 3) Передаточная функция по каналу «температура НТКС t_{ks} – теплота, переданная конвективным теплообменом непогруженной части ППН $Q_{ppn}^{ug.k}$ »

$$W_{ppn}^{ug.k}(p) = f(t_{ks}; t_v^{ek}; k_{ppn}^{ks});$$

- 4) Передаточная функция по каналу «температура НТКС t_{ks} – теплота, переданная лучевым теплообменом непогруженной части ППН $Q_{ppn}^{ug.l}$ »

$$W_{ppn}^{ug.l}(p) = f(t_{ks}; t_v^{ek}; k_{ppn}^{ks});$$

- 5) Передаточная функция по каналу «температура НТКС t_{ks} – теплота, переданная лучевым теплообменом ЭПН Q_{epn}^l »

$$W_{epn}^l(p) = f(t_{ks}; t_v^{ek});$$

- 6) Передаточная функция по каналу «температура НТКС t_{ks} – теплота, переданная конвективным теплообменом ЭПН Q_{epn}^k »

$$W_{epn}^k(p) = f(t_{ks}; t_v^{ek});$$

7) Передаточная функция по каналу «температура уходящих газов после ЭПН t'_{ug} – теплота, переданная конвективным теплообменом КПН Q_{kpn} »

$$W_{kpn}(p) = f(t'_{ug}; t_v^{ppn+kpn});$$

8) Передаточная функция по каналу «температура уходящих газов после КПН t''_{ug} – теплота, переданная конвективным теплообменом ЭК Q_{epn} »

$$W_{ek}(p) = f(t''_{ug}; t_v^o);$$

9) Передаточная функция в общем виде по каналу «теплота, воспринятая поверхностью нагрева от уходящих дымовых газов, Q_{pn} – температура воды на выходе из поверхности нагрева t_v »

$$W_{tv}(p) = f(Q, t_v);$$

10) Передаточная функция в общем виде по каналу «теплота, воспринятая поверхностью нагрева от уходящих дымовых газов, Q_{pn} – температура дымовых уходящих газов на выходе из поверхности нагрева t_{ug} »

$$W_{tug}(p) = f(\Delta Q, V_{ug});$$

11) Передаточная функция в общем виде по каналу «объем дымовых газов V_{ug} и температура НТКС t_{ks} – теплота, воспринятая от слоя уходящими дымовыми газами $Q_{k.a.}^{ug}$ »

$$W_{Qug} = f(t_{ks}, V_{ug}).$$

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Методика экспериментальных исследований

«Утверждаю»

Проректор, ДонНТУ по
научной деятельности, профессор,
доктор технических наук
Башков Е.А.



«Утверждаю»

Главный инженер ГП

«Шахтоуправление

«Южнодонбасское» №1»

Овсиенко В.Н.



**Методика исследования динамических характеристик топки
низкотемпературного кипящего слоя шахтного автономного
воздухоподогревателя шахты 4-21**

ГП «Шахтоуправление «Южнодонбасское» №1»

От шахты 4-21

ГП «Шахтоуправление «Южнодонбасское» №1»

Главный механик

_____ Попиль С.В.

От Донецкого Национального Технического Университета

Ассистент кафедры ГЭА

_____ Неежмаков С.В.

Ассистент кафедры ГЭА

_____ Ткаченко А.Е.

Доцент кафедры ГЭА, к.т.н.

_____ Гавриленко Б.В.

Зав каф. ГЭА, доцент, к.т.н.

_____ Маренич К.Н.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Технической базой для выполнения исследований является топка низкотемпературного кипящего слоя шахтного автономного воздухоподогревателя шахты 4-21 ГП «Шахтоуправление «Южнодонбасское» №1»

Цель исследований.

Экспериментальное определение динамических характеристик тепловых физических процессов, протекающих в топке низкотемпературного кипящего слоя.

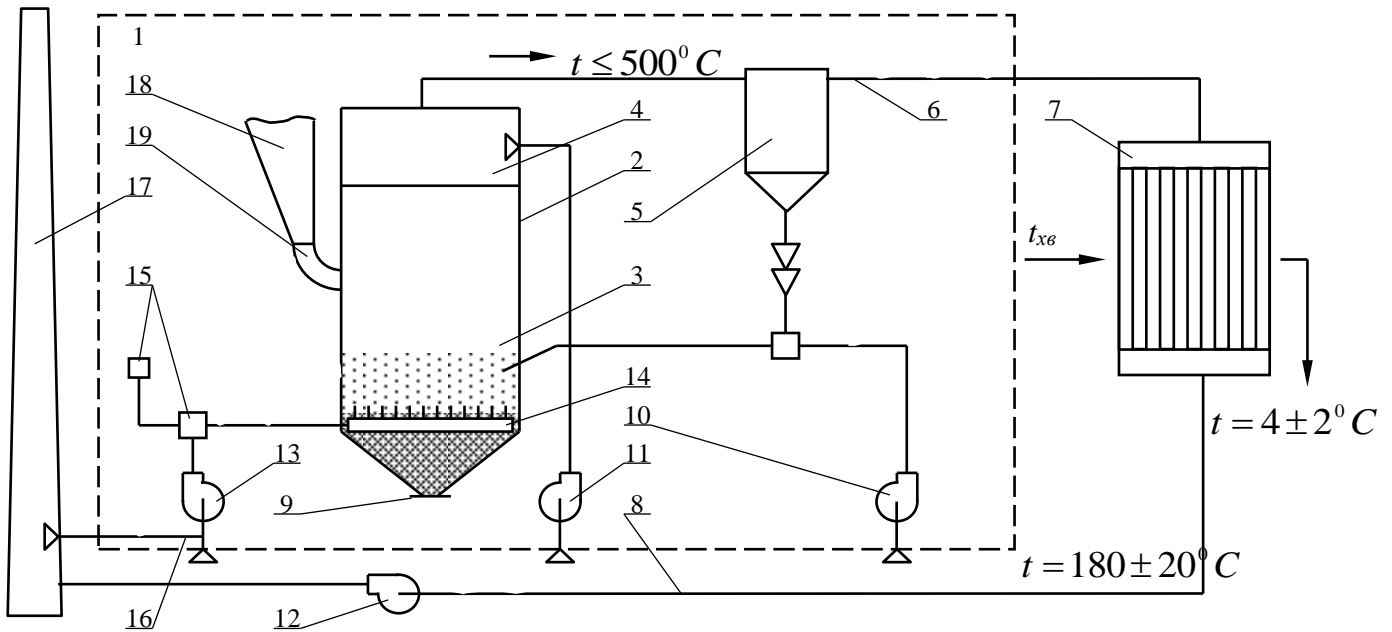
Объект исследований.

Для исследований выбрана топка низкотемпературного кипящего слоя шахтного автономного воздухоподогревателя шахты 4-21 ГП «Шахтоуправление «Южнодонбасское» №1», схема которого приведена на рис.Б.1.

Для нагрева подаваемого в шахту воздуха предусматривается использование тепла, получаемого от сжигания низкосортного высокозольного угля в топке 3.

Дымовые газы, являющиеся теплоносителем с температурой кипящего слоя, из топочной камеры направляются в камеру смешения 4, в которую центробежным вентилятором 11 подается также и холодный воздух. Забор этого воздуха осуществляется вне топочного здания. В результате смешения температура газовойоздушной смеси снижается до 500°C.

После камеры смешения за счет разрежения, создаваемого дымососом 12 газовойоздушная смесь проходит двухступенчатую систему очистки от твердых частиц 5. Далее газовойоздушная смесь по газоходам 6 направляется в трубчатые воздухонагреватели 7. Пройдя по трубам воздухоподогревателя, газовойоздушная смесь передает тепло наружному воздуху, поступающему через жалюзийные решетки в межтрубное пространство и воздухоподогреватели за счет общешахтной депрессии.



1 – здание котельной; 2 – теплогенератор низкотемпературного кипящего слоя на твердом топливе; 3 – топочная камера; 4 – камера смешения; 5 – двухступенчатая система газоочистки; 6 – газопровод горячих газов; 7 – воздухоподогреватели; 8 – газопровод холодных газов; 9 – система золоудаления; 10 и 11-вентиляторы, соответственно, возврата уноса и разбавочного воздуха; 12 – дымосос; 13 – вентилятор дутьевого воздуха; 14 – провальная трубная колпачковая воздухораспределительная решетка; 15 – растопочное устройство; 16 – газопровод рециркуляции дымовых газов; 17 – дымовая труба; 18 – угольный бункер; 19 – забрасыватель; $T_{xв}$ – температура холодного воздуха.

Рисунок Б.1 –Технологическая схема автономного газозвоздушного воздухоподогревателя с топкой низкотемпературного кипящего слоя

Воздух после воздухоподогревателей может быть нагрет до температуры 2...50°C. Непосредственно нагретый воздух или воздушная смесь, образующаяся после его разбавления засасываемым холодным наружным воздухом, с температурой не ниже 2...6°C поступает в ствол шахты.

Отработанная газозвоздушная смесь с температурой 100...250°C транспортируется по газоходу 8 и выбрасывается в атмосферу через дымовую трубу 17.

ПРОГРАММА ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследование динамических характеристик топki НТКС включает следующие этапы:

1. Экспериментальное определение зависимости изменения температуры кипящего слоя при изменении производительности забрасывателя.
2. Экспериментальное определение зависимости изменения температуры кипящего слоя при изменении производительности дутьевого вентилятора.
3. Анализ результатов экспериментальных исследований.

ХАРАКТЕРИСТИКА ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ

Для выполнения программы исследования требуется набор следующего оборудования: первичные преобразователи измеряемых параметров, вторичные преобразователи (показывающие приборы).

Первичный преобразователь осуществляет преобразование измеряемых неэлектрических параметров в электрический сигнал. Схема расположения первичных преобразователей на технологическом объекте приведена на рис.Б.2

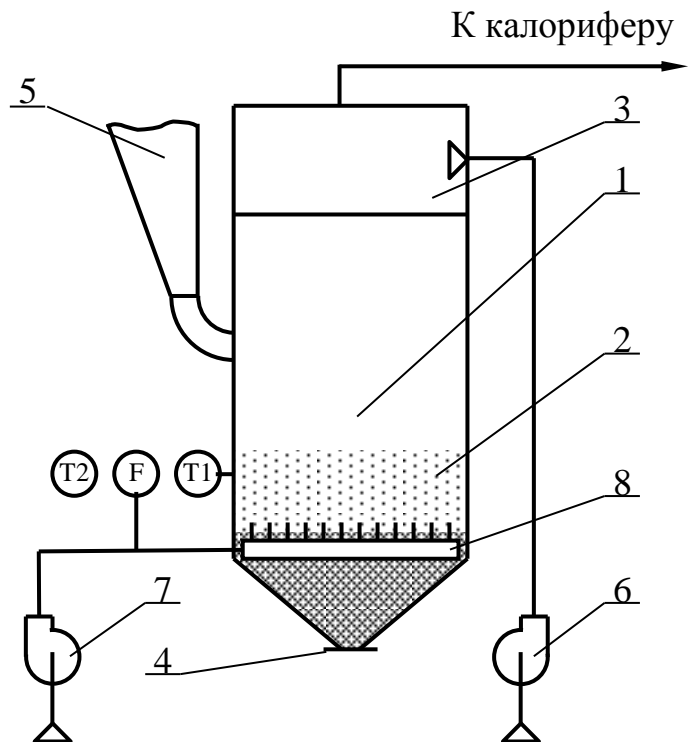


Рисунок Б.2 – Схема размещения средств отбора информации.

1 – топочная камера; 2 – кипящий слой; 3 – камера смешения; 4 – система золоудаления; 5 – система подач топлива; 6 – вентилятор разбавочного воздуха; 7 – вентилятор дутьевого воздуха; 8 – провальная трубная колпачковая воздухораспределительная решетка

Вторичный преобразователь производит линеаризацию выходной характеристики первичного преобразователя и приведение выходных сигналов к стандартным значениям.

В качестве средств отбора информации используются следующие измерительные средства:

1. Первичный преобразователь для измерения температуры кипящего слоя (Т1) – термоэлектрический преобразователь ТХА706-02:

- диапазон измеряемых температур, °С -50...+1000;
- номинальная статическая характеристика преобразования ХА;
- показатель тепловой инерции, с 60;
- длина погружаемой части, м 1,6;

2. Вторичный прибор для измерения температуры кипящего слоя –КВП1:

- класс точности 0,5;
- длина шкалы, мм 500;
- время пробега указателем всей шкалы, с 10

3. Для определения производительности дутьевого вентилятора – камерная диафрагма ДК16-150-П.

4. Первичный преобразователь для измерения производительности дутьевого вентилятора (F) – дифференциальный манометр ДМ3583М:

- пределы измерения, кПа 0-1,6;
- предел основной допускаемой погрешности, % $\pm 1,5$;
- выходной сигнал, мГн 0-10;

5. Вторичный прибор для измерения производительности дутьевого вентилятора КВД1:

- класс точности 1;
- длина шкалы, мм 500;
- время пробега указателем всей шкалы, с 10;

6. Для измерения температуры воздуха – ртутный технический термометр П-5 (Т2):

- пределы измерения, °С -30...+50;

- цена деления, °C 1;
- предел допускаемой основной погрешности, % ± 1 .

Объемная производительность забрасывателя оценивается по уровню твердого топлива в загрузочном бункере. Поверка измерительных приборов выполнена в условиях ОАО «Теплоэнергоавтоматика» (г. Донецк).

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования предполагают непрерывные измерения с ручной регистрацией температуры НТКС и производительности дутьевого вентилятора, а также оценкой производительности забрасывателя по уровню твердого топлива в бункере с помощью перечисленных измерительных средств согласно программы экспериментов, описанной выше.

Все этапы программы экспериментальных исследований выполняются в процессе естественной работы котлоагрегата. Ступенчатые воздействия по производительности забрасывателя и дутьевого вентилятора формируются в режиме ручного управления на величину, не выводящую температуру в топочном пространстве за пределы существования кипящего слоя. Алгоритм функционирования воздухоподогревателя позволяет выполнить все этапы программы экспериментальных исследований без внесения существенных изменений в график работы установки.

При не прогнозируемых отклонениях значений исследуемых параметров производится их регулирование исполнительными механизмами забрасывателя и направляющего аппарата вентилятора, а замеры текущего опыта выполняются заново. Количество опытов для каждого управляющего воздействия принято равным четырем. Замеры производятся до окончания переходных процессов.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты замеров температуры заносятся в журнал наблюдений и обработки данных, вид которого представлен в таблице Б.1.

Таблица Б.1. Журнал наблюдений и обработки данных.

№ п\п	Время, с	Результаты наблюдений y , температура НТКС, °С				Усредненное значение результатов измерений \bar{y} , °С	Дисперсия воспроизводимости σ^2 , °С	Результаты моделирования, температура НТКС, °С	Дисперсия неадекватности σ_n^2 , °С
		Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3	Опыт 4				
1									
2									
...									
N									

Результаты наблюдений для каждого замера усредняются по выражению:

$$\bar{y}_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m y_{ji}, \quad (1)$$

где y_{ji} - величина температуры для i -того опыта и j -того замера.

Оценки дисперсии для проверки воспроизводимости определяются из выражения:

$$\sigma_j^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (y_{ji} - \bar{y}_j)^2. \quad (2)$$

Соответственно дисперсия воспроизводимости для эксперимента:

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \sigma_j^2, \quad (3)$$

где N – число замеров.

Проверка адекватности математической модели проводится с использованием F-критерия Фишера по выражению:

$$F = \frac{\sigma_n^2}{\sigma_y^2}, \quad (4)$$

где σ_n^2 - дисперсия неадекватности:

$$\sigma_n^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (\bar{y}_j - y_j)^2. \quad (5)$$

Рассчитанные значения F-критерия Фишера сравниваются с табличными значениями и делается вывод об адекватности математической модели котлоагрегата.

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Обработка результатов экспериментальных исследований

«Утверждаю»

Проректор ДонНТУ по
научно-исследовательской работе, профессор,
доктор технических наук
Шаров Е.А.



«Утверждаю»

Главный инженер ГП

«Шахтоуправление

«Южнодонецкое» №1»

Овсienko B.H.



**Протокол исследования динамических характеристик топки
низкотемпературного кипящего слоя шахтного автономного
воздухоподогревателя шахты 4-21**

ГП «Шахтоуправление «Южнодонецкое» №1»

в рамках выполнения государственной темы № Н-20-05 «Розробка системи
автоматичного керування комплексом теплопостачання з котлоагрегатами
низкотемпературного киплячого шару в умовах змінних витрат теплоносія»

От шахты 4-21

ГП «Шахтоуправление «Южнодонецкое» №1»

Главный механик

Попиль С.В.

От Донецкого Национального Технического Университета

Ассистент кафедры ГЭА

Неежников С.В.

Ассистент кафедры ГЭА

Ткаченко А.Е.

Доцент кафедры ГЭА, к.т.н.

Гавриленко Б.В.

Зав каф. ГЭА, доцент, к.т.н.

Маренич К.Н.

Данные исследований и их обработка приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица В.1 – Обработка результатов экспериментальных исследований при изменении производительности забрасывателя.

№ п\п	Вре- мя, с	Результаты наблюдений y , температура НТКС, °С				Усредненное значение результатов измерений \bar{y} , °С	Дисперсия воспроизво- димости σ^2 , °С	Результаты модели- рования, темпе- ратура НТКС, °С	Дисперсия неадекват- ности σ_n^2 , °С
		Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3	Опыт 4				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	800	800	800	800	800,0	0,00	800,84	0,71
2	30	800	800	800	800	800,0	0,00	799,64	0,13
3	60	800	800	800	800	800,0	0,00	797,44	6,55
4	90	800	800	800	800	800,0	0,00	796,44	12,67
5	120	800	800	800	800	800,0	0,00	796,81	10,18
6	150	800	800	800	800	800,0	0,00	798,25	3,06
7	180	810	800	800	800	802,5	25,00	800,42	4,33
8	210	810	810	810	810	810,0	0,00	803,17	46,65
9	240	820	810	810	810	812,5	25,00	806,30	38,44
10	270	820	810	810	810	812,5	25,00	809,71	7,78
11	300	820	810	820	810	815,0	33,33	813,35	2,72
12	330	830	820	820	820	822,5	25,00	817,04	29,81
13	360	830	820	820	820	822,5	25,00	820,80	2,89
14	390	840	820	830	820	827,5	91,67	824,57	8,58
15	420	840	830	830	830	832,5	25,00	828,31	17,56
16	450	850	830	840	830	837,5	91,67	831,98	30,47
17	480	850	830	840	840	840,0	66,67	835,56	19,71
18	510	850	840	840	840	842,5	25,00	839,04	11,97
19	540	860	840	850	840	847,5	91,67	842,41	25,91
20	570	860	840	850	850	850,0	66,67	845,65	18,92
21	600	860	840	850	850	850,0	66,67	848,79	1,46
22	630	870	850	860	850	857,5	91,67	851,79	32,60
23	660	870	850	860	860	860,0	66,67	854,65	28,62
24	690	870	850	860	860	860,0	66,67	857,38	6,86
25	720	870	850	860	870	862,5	91,67	859,98	6,35
26	750	880	860	870	870	870,0	66,67	862,47	56,70
27	780	880	860	870	880	872,5	91,67	864,85	58,52
28	810	880	860	870	880	872,5	91,67	867,11	29,05
29	840	880	860	870	880	872,5	91,67	869,26	10,50
30	870	890	870	880	880	880,0	66,67	871,31	75,52
31	900	890	870	880	890	882,5	91,67	873,26	85,38
32	930	890	870	880	890	882,5	91,67	875,12	54,46
33	960	890	870	880	890	882,5	91,67	876,89	31,47
34	990	890	870	880	890	882,5	91,67	878,58	15,37
35	1020	890	870	880	890	882,5	91,67	880,18	5,38
36	1050	900	880	890	900	892,5	91,67	881,70	116,64

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
37	1080	900	880	890	900	892,5	91,67	883,15	87,42
38	1110	900	880	890	900	892,5	91,67	884,53	63,52
39	1140	900	880	890	900	892,5	91,67	885,85	44,22
40	1170	900	880	890	900	892,5	91,67	887,09	29,27
41	1200	900	880	890	900	892,5	91,67	888,28	17,81
42	1230	900	880	890	900	892,5	91,67	889,41	9,55
43	1260	900	880	890	900	892,5	91,67	890,49	4,04
44	1290	910	890	900	910	902,5	91,67	891,51	120,78
45	1320	910	890	900	910	902,5	91,67	892,48	100,40
46	1350	910	890	900	910	902,5	91,67	893,41	82,63
47	1380	910	890	900	910	902,5	91,67	894,29	67,40
48	1410	910	890	900	910	902,5	91,67	895,13	54,32
49	1440	910	890	900	910	902,5	91,67	895,92	43,30
50	1470	910	890	900	910	902,5	91,67	896,68	33,87
51	1500	910	890	900	910	902,5	91,67	897,40	26,01
52	1530	910	890	900	910	902,5	91,67	898,09	19,45
53	1560	910	890	900	910	902,5	91,67	898,74	14,14
54	1590	910	900	900	910	905,0	33,33	899,36	31,81
55	1620	910	900	900	910	905,0	33,33	899,95	25,50
56	1650	910	900	900	910	905,0	33,33	900,51	20,16
57	1680	920	900	910	920	912,5	91,67	901,04	131,33
58	1710	920	900	910	920	912,5	91,67	901,55	119,90
59	1740	920	900	910	920	912,5	91,67	902,03	109,62
60	1770	920	900	910	920	912,5	91,67	902,49	100,20
61	1800	920	900	910	920	912,5	91,67	902,93	91,58
62	1830	920	900	910	920	912,5	91,67	903,35	83,72
63	1860	920	900	910	920	912,5	91,67	903,74	76,74
64	1890	920	900	910	920	912,5	91,67	904,12	70,22
65	1920	920	900	910	920	912,5	91,67	904,48	64,32
66	1950	920	900	910	920	912,5	91,67	904,82	58,98
67	1980	920	900	910	920	912,5	91,67	905,14	54,17
68	2010	920	900	910	920	912,5	91,67	905,45	49,70
69	2040	920	900	910	920	912,5	91,67	905,74	45,70
70	2070	920	900	910	920	912,5	91,67	906,02	41,99
71	2100	920	900	910	920	912,5	91,67	906,29	38,56
72	2130	920	900	910	920	912,5	91,67	906,54	35,52
73	2160	920	900	910	920	912,5	91,67	906,78	32,72
74	2190	920	900	910	920	912,5	91,67	907,01	30,14
75	2220	920	900	910	920	912,5	91,67	907,22	27,88
76	2250	920	900	910	920	912,5	91,67	907,43	25,70
77	2280	920	900	910	920	912,5	91,67	907,63	23,72
78	2310	920	900	910	920	912,5	91,67	907,81	22,00
79	2340	920	900	910	920	912,5	91,67	907,99	20,34
80	2370	920	900	910	920	912,5	91,67	908,16	18,84
81	2400	920	900	910	920	912,5	91,67	908,32	17,47
82	2430	920	900	910	920	912,5	91,67	908,47	16,24
83	2460	920	900	910	920	912,5	91,67	908,62	15,05
84	2490	920	900	910	920	912,5	91,67	908,76	13,99
85	2520	920	900	910	920	912,5	91,67	908,89	13,03
86	2550	920	900	910	920	912,5	91,67	909,01	12,18
87	2580	920	900	910	920	912,5	91,67	909,13	11,36
88	2610	920	900	910	920	912,5	91,67	909,25	10,56

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
89	2640	920	900	910	920	912,5	91,67	909,35	9,92
90	2670	920	900	910	920	912,5	91,67	909,46	9,24
91	2700	920	900	910	920	912,5	91,67	909,55	8,70
92	2730	920	900	910	920	912,5	91,67	909,65	8,12
93	2760	920	900	910	920	912,5	91,67	909,73	7,67
94	2790	920	900	910	920	912,5	91,67	909,82	7,18
95	2820	920	900	910	920	912,5	91,67	909,90	6,76
96	2850	920	900	910	920	912,5	91,67	909,97	6,40
97	2880	920	900	910	920	912,5	91,67	910,05	6,00
98	2910	920	900	910	920	912,5	91,67	910,12	5,66
99	2940	920	900	910	920	912,5	91,67	910,18	5,38
100	2970	920	900	910	920	912,5	91,67	910,24	5,11
101	3000	920	900	910	920	912,5	91,67	910,30	4,84
102	3030	920	900	910	920	912,5	91,67	910,36	4,58
103	3060	920	900	910	920	912,5	91,67	910,41	4,37
104	3090	920	900	910	920	912,5	91,67	910,46	4,16
105	3120	920	900	910	920	912,5	91,67	910,51	3,96
106	3150	920	900	910	920	912,5	91,67	910,56	3,76
107	3180	920	900	910	920	912,5	91,67	910,60	3,61
108	3210	920	900	910	920	912,5	91,67	910,64	3,46
109	3240	920	900	910	920	912,5	91,67	910,68	3,31
110	3270	920	900	910	920	912,5	91,67	910,72	3,17
111	3300	920	900	910	920	912,5	91,67	910,76	3,03
112	3330	920	900	910	920	912,5	91,67	910,79	2,92
113	3360	920	900	920	920	915,0	100,00	910,82	17,47
114	3390	920	900	920	920	915,0	100,00	910,85	17,22
115	3420	920	900	920	920	915,0	100,00	910,88	16,97
116	3450	920	900	920	920	915,0	100,00	910,91	16,73
117	3480	920	900	920	920	915,0	100,00	910,94	16,48
118	3510	920	900	920	920	915,0	100,00	910,96	16,32
119	3540	920	900	920	920	915,0	100,00	910,99	16,08
120	3570	930	900	920	930	920,0	200,00	911,01	80,82
121	3600	930	900	920	930	920,0	200,00	911,03	80,46
122	3630	930	900	920	930	920,0	200,00	911,05	80,10
123	3660	930	900	920	930	920,0	200,00	911,07	79,74
124	3690	930	900	920	930	920,0	200,00	911,09	79,39
125	3720	930	900	920	930	920,0	200,00	911,11	79,03
126	3750	930	900	920	930	920,0	200,00	911,13	78,68
127	3780	930	900	920	930	920,0	200,00	911,14	78,50
128	3810	930	900	920	930	920,0	200,00	911,16	78,15
129	3840	930	900	920	930	920,0	200,00	911,17	77,97
130	3870	930	900	920	930	920,0	200,00	911,19	77,62
131	3900	930	910	920	930	922,5	91,67	911,20	127,69
132	3930	930	910	920	930	922,5	91,67	911,21	127,46
133	3960	930	910	920	930	922,5	91,67	911,22	127,24
134	3990	930	910	920	930	922,5	91,67	911,23	127,01
							$\Sigma=89,68$		$\Sigma=37,00$

Таблица В.2 – Обработка результатов экспериментальных исследований при изменении производительности дутьевого вентилятора.

№ п\п	Вре- мя, с	Результаты наблюдений y , температура НТКС, °C				Усредненное значение результатов измерений \bar{y} , °C	Дисперсия воспроизво- димости σ^2 , °C	Результаты модели- рования, темпе- ратура НТКС, °C	Дисперсия неадекват- ности σ_n^2 , °C
		Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3	Опыт 4				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	800	800	800	800	800	0,00	800,81	0,66
2	30	800	800	800	800	800	0,00	801,04	1,08
3	60	810	810	800	810	807,5	25,00	802,26	27,46
4	90	810	810	800	810	807,5	25,00	804,61	8,35
5	120	810	820	810	820	815	33,33	807,97	49,42
6	150	820	820	810	830	820	66,67	812,07	62,88
7	180	820	820	820	830	822,5	25,00	816,67	33,99
8	210	830	830	820	840	830	66,67	819,25	115,56
9	240	830	840	830	840	835	33,33	826,56	71,23
10	270	840	840	830	850	840	66,67	831,56	71,23
11	300	840	850	840	850	845	33,33	836,49	72,42
12	330	850	850	840	860	850	66,67	841,3	75,69
13	360	850	860	850	860	855	33,33	845,95	81,90
14	390	860	860	850	870	860	66,67	850,42	91,78
15	420	860	870	860	870	865	33,33	854,71	105,88
16	450	870	870	860	870	867,5	25,00	858,81	75,52
17	480	870	870	860	880	870	66,67	862,73	52,85
18	510	870	880	870	880	875	33,33	866,46	72,93
19	540	880	880	870	880	877,5	25,00	870,02	55,95
20	570	880	880	870	890	880	66,67	873,41	43,43
21	600	880	890	880	890	885	33,33	876,63	70,06
22	630	890	890	880	890	887,5	25,00	879,7	60,84
23	660	890	890	890	900	892,5	25,00	882,62	97,61
24	690	890	890	890	900	892,5	25,00	885,4	50,41
25	720	900	900	890	900	897,5	25,00	888,04	89,49
26	750	900	900	890	900	897,5	25,00	890,56	48,16
27	780	900	900	900	910	902,5	25,00	892,95	91,20
28	810	900	900	900	910	902,5	25,00	895,23	52,85
29	840	910	910	900	910	907,5	25,00	897,39	102,21
30	870	910	910	900	910	907,5	25,00	899,45	64,80
31	900	910	910	910	910	910	0,00	901,41	73,79
32	930	910	910	910	920	912,5	25,00	903,27	85,19
33	960	910	910	910	920	912,5	25,00	905,04	55,65
34	990	920	910	910	920	915	33,33	906,73	68,39
35	1020	920	920	910	920	917,5	25,00	908,33	84,09
36	1050	920	920	910	920	917,5	25,00	909,86	58,37
37	1080	920	920	920	920	920	0,00	911,31	75,52
38	1110	920	920	920	930	922,5	25,00	912,69	96,24
39	1140	920	920	920	930	922,5	25,00	914,01	72,08

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
40	1170	930	920	920	930	925	33,33	915,25	95,06
41	1200	930	920	920	930	925	33,33	916,6	70,56
42	1230	930	920	920	930	925	33,33	917,57	55,20
43	1260	930	930	920	930	927,5	25,00	918,65	78,32
44	1290	930	930	920	930	927,5	25,00	919,67	61,31
45	1320	930	930	930	930	930	0,00	920,64	87,61
46	1350	930	930	930	930	930	0,00	921,57	71,06
47	1380	930	930	930	930	930	0,00	922,45	57,00
48	1410	930	930	930	940	932,5	25,00	923,29	84,82
49	1440	930	930	930	940	932,5	25,00	924,08	70,90
50	1470	940	930	930	940	935	33,33	924,84	103,23
51	1500	940	930	930	940	935	33,33	925,56	89,11
52	1530	940	930	930	940	935	33,33	926,25	76,56
53	1560	940	930	930	940	935	33,33	926,9	65,61
54	1590	940	930	930	940	935	33,33	927,52	55,95
55	1620	940	930	930	940	935	33,33	928,11	47,47
56	1650	940	940	930	940	937,5	25,00	928,67	77,97
57	1680	940	940	930	940	937,5	25,00	929,2	68,89
58	1710	940	940	940	940	940	0,00	929,71	105,88
59	1740	940	940	940	940	940	0,00	930,19	96,24
60	1770	940	940	940	940	940	0,00	930,65	87,42
61	1800	940	940	940	940	940	0,00	931,09	79,39
62	1830	940	940	940	940	940	0,00	931,51	72,08
63	1860	940	940	940	940	940	0,00	931,9	65,61
64	1890	940	940	940	940	940	0,00	932,28	59,60
65	1920	940	940	940	940	940	0,00	932,64	54,17
66	1950	940	940	940	940	940	0,00	932,98	49,28
67	1980	940	940	940	940	940	0,00	933,3	44,89
68	2010	940	940	940	940	940	0,00	933,61	40,83
69	2040	940	940	940	950	942,5	25,00	933,9	73,96
70	2070	940	940	940	950	942,5	25,00	934,18	69,22
71	2100	950	940	940	950	945	33,33	934,45	111,30
72	2130	950	940	940	950	945	33,33	934,7	106,09
73	2160	950	940	940	950	945	33,33	934,94	101,20
74	2190	950	940	940	950	945	33,33	935,17	96,63
75	2220	950	940	940	950	945	33,33	935,38	92,54
76	2250	950	940	940	950	945	33,33	935,59	88,55
77	2280	950	940	940	950	945	33,33	935,79	84,82
78	2310	950	940	940	950	945	33,33	935,97	81,54
79	2340	950	940	940	950	945	33,33	936,15	78,32
80	2370	950	940	940	950	945	33,33	936,32	75,34
81	2400	950	940	940	950	945	33,33	936,48	72,59
82	2430	950	940	940	950	945	33,33	936,63	70,06
83	2460	950	940	940	950	945	33,33	936,78	67,57
84	2490	950	940	940	950	945	33,33	936,92	65,29
85	2520	950	940	940	950	945	33,33	937,05	63,20
86	2550	950	940	940	950	945	33,33	937,17	61,31
87	2580	950	940	940	950	945	33,33	937,29	59,44
88	2610	950	940	940	950	945	33,33	937,41	57,61
89	2640	950	940	940	950	945	33,33	937,51	56,10
90	2670	950	940	940	950	945	33,33	937,62	54,46
91	2700	950	940	940	950	945	33,33	937,71	53,14

92	2730	950	940	940	950	945	33,33	937,81	51,70
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
93	2760	950	940	940	950	945	33,33	937,89	50,55
94	2790	950	940	940	950	945	33,33	937,98	49,28
95	2820	950	940	940	950	945	33,33	938,06	48,16
96	2850	950	940	940	950	945	33,33	938,13	47,20
97	2880	950	940	940	950	945	33,33	938,21	46,10
98	2910	950	940	940	950	945	33,33	938,28	45,16
99	2940	950	940	940	950	945	33,33	938,34	44,36
100	2970	950	940	940	950	945	33,33	938,4	43,56
101	3000	950	940	940	950	945	33,33	938,46	42,77
102	3030	950	940	940	950	945	33,33	938,52	41,99
103	3060	950	940	940	950	945	33,33	938,57	41,34
104	3090	950	940	940	950	945	33,33	938,62	40,70
105	3120	950	940	940	950	945	33,33	938,67	40,07
106	3150	950	940	940	950	945	33,33	938,72	39,44
107	3180	950	940	940	950	945	33,33	938,76	38,94
108	3210	950	940	940	950	945	33,33	938,8	38,44
109	3240	950	940	940	950	945	33,33	938,84	37,95
110	3270	950	940	940	950	945	33,33	938,88	37,45
111	3300	950	940	940	950	945	33,33	938,92	36,97
112	3330	950	940	940	950	945	33,33	938,95	36,60
113	3360	950	950	940	950	947,5	25,00	938,98	72,59
114	3390	950	950	940	950	947,5	25,00	939,01	72,08
115	3420	950	950	950	950	950	0,00	939,04	120,12
116	3450	950	950	950	950	950	0,00	939,07	119,46
117	3480	950	950	950	950	950	0,00	939,1	118,81
118	3510	950	950	950	950	950	0,00	939,12	118,37
119	3540	950	950	950	950	950	0,00	939,15	117,72
120	3570	950	950	950	950	950	0,00	939,17	117,29
121	3600	950	950	950	950	950	0,00	939,19	116,86
122	3630	950	950	950	950	950	0,00	939,21	116,42
123	3660	950	950	950	950	950	0,00	939,23	115,99
124	3690	950	950	950	950	950	0,00	939,25	115,56
125	3720	950	950	950	950	950	0,00	939,27	115,13
126	3750	950	950	950	950	950	0,00	939,29	114,70
127	3780	950	950	950	950	950	0,00	939,3	114,49
128	3810	950	950	950	950	950	0,00	939,32	114,06
129	3840	950	950	950	950	950	0,00	939,33	113,85
130	3870	950	950	950	950	950	0,00	939,35	113,42
131	3900	950	950	950	950	950	0,00	939,36	113,21
132	3930	950	950	950	950	950	0,00	939,37	113,00
133	3960	950	950	950	950	950	0,00	939,38	112,78
134	3990	950	950	950	950	950	0,00	939,39	112,57
							$\Sigma=23,76$		$\Sigma=73,21$

Дисперсии воспроизводимости и неадекватности составили $\sigma_{y1}^2=89,68^\circ\text{C}$, $\sigma_{y2}^2=23,79^\circ\text{C}$, $\sigma_{n1}^2=37,00^\circ\text{C}$, $\sigma_{n2}^2=73,21^\circ\text{C}$, а сравнение с табличным значением критерия Фишера:


$$F_1 = \frac{\sigma_{n1}^2}{\sigma_{y1}^2} = 4,01 < 4,49, \quad F_2 = \frac{\sigma_{n2}^2}{\sigma_{y2}^2} = 3,08 < 4,49.$$

Таким образом, разработанная модель топки низкотемпературного кипящего слоя при уровне доверительной вероятности 0,95 адекватна реальным процессам в котлоагрегате.

От шахты 4-21


ГП «Шахтоуправление «Южнодонбасское» №1»

Главный механик

 Попиль С.В.

От Донецкого Национального Технического Университета

Ассистент кафедры ГЭА

 Неежмаков С.В.

Ассистент кафедры ГЭА

 Ткаченко А.Е.

Доцент кафедры ГЭА, к.т.н.

 Гавриленко Б.В.

Зав кафедрой ГЭА, доцент, к.т.н.

 Маренич К.Н.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Листинг прогнозного расчета в среде MathCad теплотребления шахты

Исходные данные, определяемые для каждого j-го шахтного здания и сооружения:

$K := 1.1$ - коэффициент влияния скорости ветра
 $\delta_{ot,j}$ - удельная отопительная характеристика j-го здания
 $\delta_{vent,j}$ - удельная вентиляционная характеристика j-го здания
 $V_{zd,j}$ - кубатура j-го здания
 $T_{pot,zd,j}$ - нормативная температура внутри j-го шахтного здания
 $g_{vent,voz,d} := 325 \frac{m^3}{c}$ - расход воздуха на вентиляцию шахты калориферной установкой

Расчетные зависимости:

$Q_{ot,j}(T_{vnesh}) := K \cdot \delta_{ot,j} \cdot V_{zd,j} \cdot (T_{pot,zd,j} - T_{vnesh})$ - расход тепла на отопление j-го здания
 $Q_{vent,j}(T_{vnesh}) := \delta_{vent,j} \cdot V_{zd,j} \cdot (T_{pot,zd,j} - T_{vnesh})$ - расход тепла на вентиляцию j-го здания
 $Q_{kal}(T_{vnesh}) := \begin{cases} Q_{kal} \leftarrow 4850000 \cdot [g_{vent,voz,d} \cdot (4 - T_{vnesh})] & \text{if } T_{vnesh} < 4 \\ Q_{kal} \leftarrow 0 & \text{otherwise} \end{cases}$ - расход тепла калориферной установкой на проветривание шахты
 $Q_{otobsh}(T_{vnesh})$ - общий расход тепла на отопление всех зданий, сумма всех $Q_{ot,j}$, $j=1...n$
 $Q_{ventobsh}(T_{vnesh})$ - общий расход тепла на проветривание всех зданий, сумма всех $Q_{vent,j}$, $j=1...n$

Общий расход тепла всей шахтой:

$$Q_{shahti}(T_{vnesh}) := Q_{otobsh}(T_{vnesh}) + Q_{ventobsh}(T_{vnesh}) + Q_{kal}(T_{vnesh})$$

Температура внешнего воздуха(переменная) - определяется для каждых суток на основе прогноза погоды (на примере декабря 2017 г.)

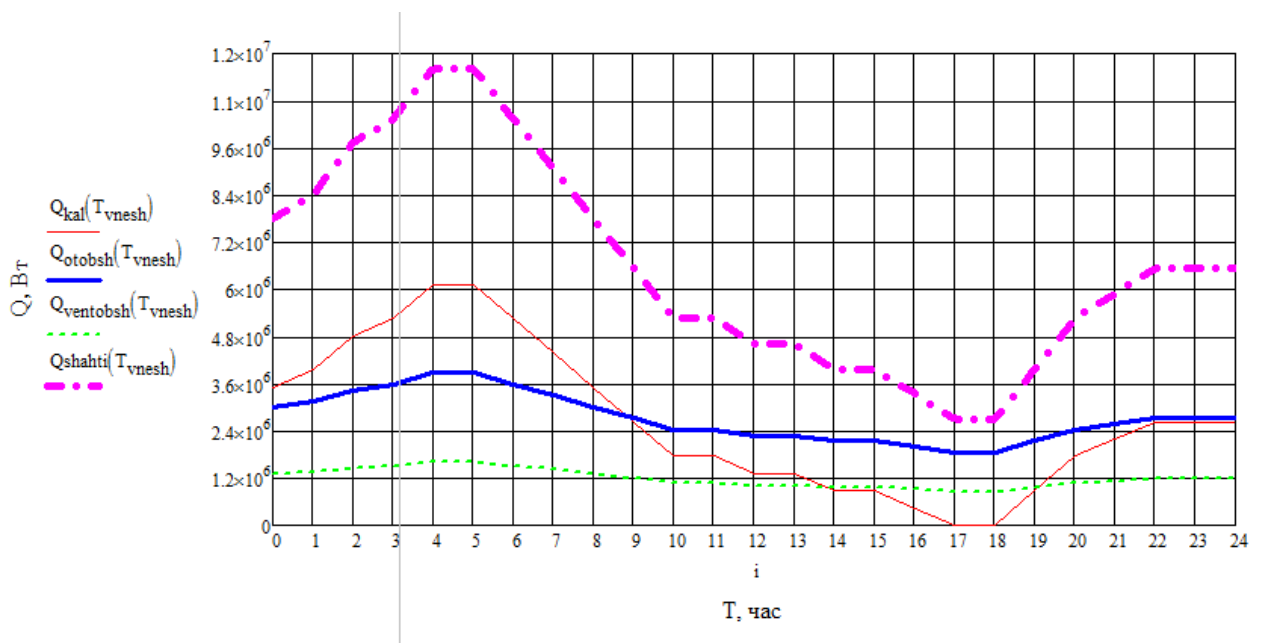
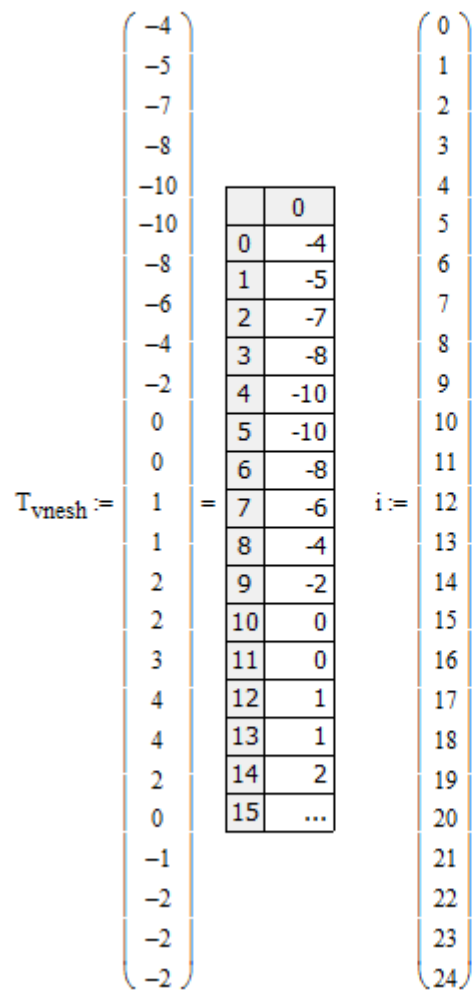


Рисунок Г.1 – График теплотребления шахты «Южнодонбасская №1» (г. Угледар) в течение суток на примере декабря 2017 г.

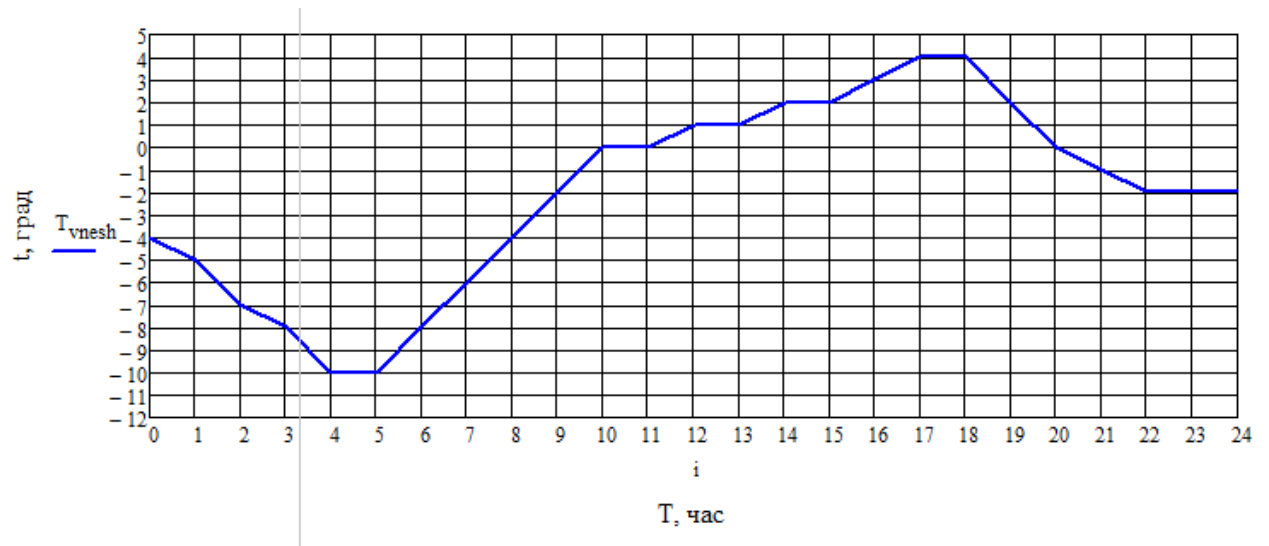


Рисунок Г.2 – График изменения температуры наружного воздуха в течение суток на примере декабря 2017 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Листинг программной реализации методики расчета рационального состава и
производительности группы котлоагрегатов с топками НТКС в среде
MatLab

*“Расчет исходных массивов значений КПД котлоагрегатов от их производительности на
основании рассчитанных коэффициентов полиномов*

```
Qkmax=[2.33 3.5 4 8 2]
```

```
Qkmin=[1.165 1.75 2 4 1]
```

```
n=5
```

```
for i=1:1:n
```

```
    for j=1:1:1000
```

```
        prom=Qkmax(i)*j/1000
```

```
        if prom>Qkmin(i)
```

```
            Qk(i,j)=prom
```

```
        else Qk(i,j)=0
```

```
    end
```

```
end
```

```
end
```

```
a=[-14.295 -0.5134 -1.4126 -0.1824 -5.9]
```

```
b=[62.79 -0.572 10.65 2.63 12.1]
```

```
c=[-81.987 15.65 -23.88 -10.67 7.06]
```

```
d=[104.87 52.07 93.44 87.22 62.77]
```

```
for i=1:1:n
```

```
    for j=1:1:1000
```

```
        if Qk(i,j)>Qkmin(i)
```



```

kpd(i,j)=a(i)*(Qk(i,j)^3)+b(i)*(Qk(i,j)^2)+c(i)*Qk(i,j)+d(i)
else kpd(i,j)=0
end
end
end
end

```

“Первый цикл приближенного расчета рациональных значений производительностей КА

Qt=12

Qtm=Qt*1.05

kp=1

for i=950:-100:1

p(1)=Qk(1,i)*kpd(1,i)

for j=950:-100:1

p(2)=Qk(2,j)*kpd(2,j)

n2=Qk(1,i)+Qk(2,j)

for k=950:-100:1

p(3)=Qk(3,k)*kpd(3,k)

n3=n2+Qk(3,k)

for l=950:-100:1

p(4)=Qk(4,l)*kpd(4,l)

n4=n3+Qk(4,l)

for u=950:-100:1

Qs=n4+Qk(5,u)

if Qtm>Qs

if Qt<Qs

kpdtek=(p(1)+p(2)+p(3)+p(4)+Qk(5,u)*kpd(5,u))/Qs

Qsy=Qs

else kpdtek=0

end

else kpdtek=0

```

end
if kpdtek>kp
    kp=kpdtek
    Qrek=[Qk(1,i) Qk(2,j) Qk(3,k) Qk(4,l) Qk(5,u)]
    y=[i j k l u]
end
end
end
end
end
end
end

```

“Второй цикл уточненного расчета рациональных значений производительностей КА

```

for i=1:1:5
    prom=y(i)
    if prom<51
        Yn(i)=10
    else Yn(i)=y(i)-100
    end
    if prom>949
        Yv(i)=990
    else Yv(i)=y(i)+100
    end
end
end

Qtm=Qt*1.01
kpk=1
for i=Yv(1):-20:Yn(1)
    p(1)=Qk(1,i)*kpd(1,i)
    for j=Yv(2):-20:Yn(2)
        p(2)=Qk(2,j)*kpd(2,j)
    end
end

```

```

n2=Qk(1,i)+Qk(2,j)
for k=Yv(3):-20:Yn(3)
    p(3)=Qk(3,k)*kpd(3,k)
    n3=n2+Qk(3,k)
    for l=Yv(4):-20:Yn(4)
        p(4)=Qk(4,l)*kpd(4,l)
        n4=n3+Qk(4,l)
        for u=Yv(5):-20:Yn(5)
            Qs=n4+Qk(5,u)
            if Qtmm>Qs
                if Qt<Qs
                    kpdtek=(p(1)+p(2)+p(3)+p(4)+Qk(5,u)*kpd(5,u))/Qs
                    Qsyk=Qs
                else kpdtek=0
            end
        else kpdtek=0
        end
        if kpdtek>kpk
            kpk=kpdtek
            Qrekk=[Qk(1,i) Qk(2,j) Qk(3,k) Qk(4,l) Qk(5,u)]
            yk=[i j k l u]
        end
    end
end
end
end
end
end
end

```

*“Окончательный цикл точного расчета рациональных значений производительностей
КА*

```

for i=1:1:5

```

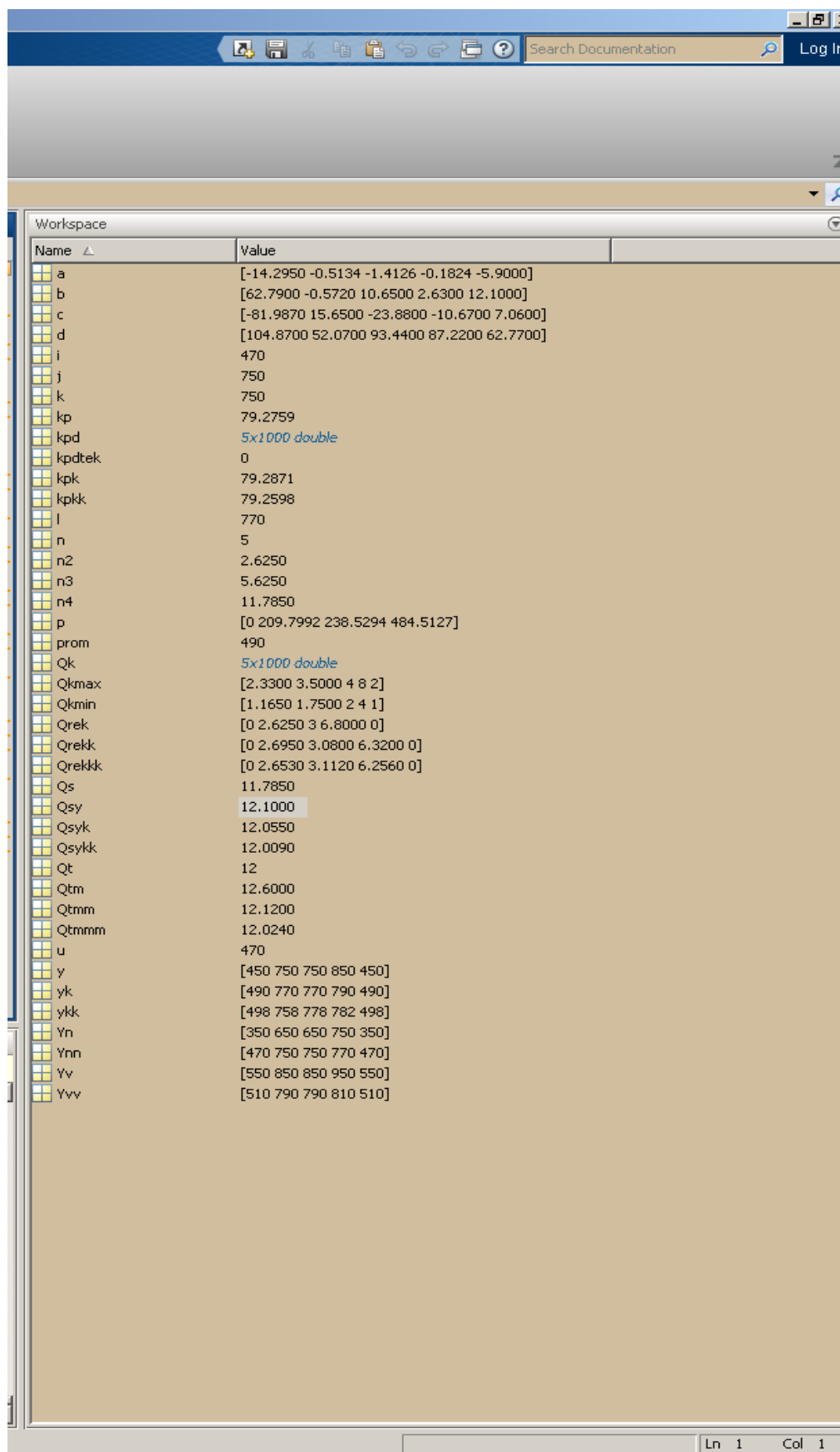
```

prom=yk(i)
if prom<11
    Ynn(i)=2
else Ynn(i)=yk(i)-20
end
if prom>989
    Yvv(i)=998
else Yvv(i)=yk(i)+20
end
end

Qtmmm=Qt*1.002
kpkk=1
for i=Yvv(1):-4:Ynn(1)
    p(1)=Qk(1,i)*kpd(1,i)
    for j=Yvv(2):-4:Ynn(2)
        p(2)=Qk(2,j)*kpd(2,j)
        n2=Qk(1,i)+Qk(2,j)
        for k=Yvv(3):-4:Ynn(3)
            p(3)=Qk(3,k)*kpd(3,k)
            n3=n2+Qk(3,k)
            for l=Yvv(4):-4:Ynn(4)
                p(4)=Qk(4,l)*kpd(4,l)
                n4=n3+Qk(4,l)
                for u=Yvv(5):-4:Ynn(5)
                    Qs=n4+Qk(5,u)
                    if Qtmmm>Qs
                        if Qt<Qs
                            kpdtek=(p(1)+p(2)+p(3)+p(4)+Qk(5,u)*kpd(5,u))/Qs
                            Qsykk=Qs
                        else kpdtek=0
                    end
                end
            end
        end
    end
end

```

```
else kpdtek=0
end
if kpdtek>kpkk
    kpkk=kpdtek
    Qrekkk=[Qk(1,i) Qk(2,j) Qk(3,k) Qk(4,l) Qk(5,u)]
    ykk=[i j k l u]
end
end
end
end
end
end
```



Name	Value
a	[-14.2950 -0.5134 -1.4126 -0.1824 -5.9000]
b	[62.7900 -0.5720 10.6500 2.6300 12.1000]
c	[-81.9870 15.6500 -23.8800 -10.6700 7.0600]
d	[104.8700 52.0700 93.4400 87.2200 62.7700]
i	470
j	750
k	750
kp	79.2759
kpd	5x1000 double
kpdtek	0
kpk	79.2871
kpkk	79.2598
l	770
n	5
n2	2.6250
n3	5.6250
n4	11.7850
p	[0 209.7992 238.5294 484.5127]
prom	490
Qk	5x1000 double
Qkmax	[2.3300 3.5000 4 8 2]
Qkmin	[1.1650 1.7500 2 4 1]
Qrek	[0 2.6250 3 6.8000 0]
Qrekk	[0 2.6950 3.0800 6.3200 0]
Qrekkk	[0 2.6530 3.1120 6.2560 0]
Qs	11.7850
Qsy	12.1000
Qsyk	12.0550
Qsykk	12.0090
Qt	12
Qtm	12.6000
Qtmm	12.1200
Qtmmm	12.0240
u	470
y	[450 750 750 850 450]
yk	[490 770 770 790 490]
ykk	[498 758 778 782 498]
Yn	[350 650 650 750 350]
Ynn	[470 750 750 770 470]
Yv	[550 850 850 950 550]
Yvv	[510 790 790 810 510]

Рисунок Д.1 – Скрин рабочего окна в среде MatLab с результатами расчета рациональных производительностей и средневзвешенного КПД группы котлов

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Перечень элементов принципиальной схемы блока согласования

Таблица Е.1 – Перечень элементов блока согласования

Позиция	Наименование	Кол.	Прим
	<i>Микросхемы</i>		
DA1-DA5	К140УД12	5	
R2, R6, R10, R14, R18	<i>Резисторы</i>		
R4, R8, 12, R16, R20	МЛТ-0,125 – 1К	5	
R5, R9, R13, R17, R21	МЛТ-0,125 – 10К	5	
R3, R7, R11	МЛТ-0,125 – 100К	5	
R15	МЛТ-0,125 – 20К	3	
	МЛТ-0,125 – 300К	1	
R19	МЛТ-0,125 – 2.2М	1	
	<i>Разъемы</i>		
XP1, XP2	РП10-0Г	2	
XP3	РП3-0Г	1	

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

Справки о внедрении результатов диссертационного исследования



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ

«ДОНГИПРОШАХТ»

ул. Артема, 125, г. Донецк, 83001

тел./факс (062) 305-36-11

E-mail: dgsh@dgsh.donetsk.ua

www.dgsh.donetsk.ua

Код ЕГРПОУ 51001837

02.04.2018 № 01-10/9

На № _____

Диссертационный совет Д 01.005.01 при
ГОУ ВПО «Донбасская национальная
академия строительства и архитектуры»

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы Ткаченко
Анны Евгеньевны на тему: «Повышение энергоэкономической эффективности
котлоагрегатов с низкотемпературным кипящим слоем систем теплоснабжения
шахт», представленную на соискание ученой степени кандидата технических
наук по специальности 05.23.03 – теплоснабжение, вентиляция, кондициониро-
вание воздуха, газоснабжение и освещение

Государственное учреждение «Донгипрошахт» приняло к использованию при состав-
лении технических проектов модернизации котельных установок угольных шахт:

- 1) Схемы теплоснабжения шахт с источником тепла группы котельных агрегатов НТКС, совместно включенных в тепловую сеть;
- 2) Математическую модель распределения массовых и энергетических потоков в котлоагрегате НТКС при производстве тепла для расчета векторов технологических параметров топок, а также исследования поведения слоя при различных комбинациях управляющих воздействий при переходе из одной рабочей точки в другую;
- 3) Методику поиска рационального состава и производительности котлоагрегатов НТКС, что позволяет в оперативном режиме пересчитывать задания на тепловую производи-
тельность котельных агрегатов и их режимные параметры в зависимости от прогнозируемого
изменения температуры окружающей среды.



Директор





**ДОНЕЦКАЯ НАРОДНАЯ РЕСПУБЛИКА
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
"ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"**

283001, г. Донецк, ул. Артема, 58 тел.: (062) 337-17-33, 335-75-62, факс: (062) 304-12-78
эл. почта: donntu.info@mail.ru

22.02.18 № 24-12/65

На № _____

Диссертационный совет Д 01.005.01
при ГОУ ВПО «Донбасская национальная
академия строительства и архитектуры»

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы Ткаченко Анны Евгеньевны на тему: «Повышение энергоэкономической эффективности котлоагрегатов с низкотемпературным кипящим слоем систем теплоснабжения шахт», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.03 – теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение в учебный процесс ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет»

Результаты диссертационных исследований Ткаченко А.Е., а именно методика расчета рационального состава котлов с топками НТКС и производительности каждого котла исходя из прогнозируемого теплового спроса, математическая модель производства и передачи тепловой энергии в котлоагрегате НТКС, которая отличается от существующих моделей возможностью учета параметров погружных поверхностей нагрева, а также особенности управления низкотемпературным кипящим слоем при различных комбинациях управляющих воздействий при смене режимов работы котла, внедрены в учебный процесс при чтении курсов лекций по дисциплинам «Котельные установки промышленных предприятий», «Автоматизация технологических процессов и производств» для студентов направления подготовки 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств» и «Идентификация и моделирование технологических объектов» для студентов направления подготовки 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств», а также специальности 21.05.04 «Горное дело» (специализация №10 «Электрификация и автоматизация горного производства»), что отражено в учебно-методических комплексах указанных дисциплин.

Проректор по научно-педагогической работе
ГОУ ВПО «Донецкий национальный
технический университет», профессор

А.А. Каракозов

Начальник учебного отдела
ГОУ ВПО «Донецкий национальный
технический университет», профессор

Б.В. Гавриленко

Заведующий кафедрой «Горная электротехника и
автоматика им. Р.М. Лейбова»
ГОУ ВПО «Донецкий национальный
технический университет», профессор

К.Н. Маренич

Заведующий кафедрой «Техническая теплофизика»
ГОУ ВПО «Донецкий национальный
технический университет», профессор

А.Б. Бирюков



**ДОНЕЦКАЯ НАРОДНАЯ РЕСПУБЛИКА
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
"ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"**

283001, г. Донецк, ул. Артема, 58 тел.: (062) 337-17-33, 335-75-62, факс: (062) 304-12-78
эл. почта: donntu.info@mail.ru

22.02.18 № 24-12/66

На № _____

Диссертационный совет Д 01.005.01
при ГОУ ВПО «Донбасская национальная
академия строительства и архитектуры»

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы Ткаченко Анны Евгеньевны на тему: «Повышение энергоэкономической эффективности котлоагрегатов с низкотемпературным кипящим слоем систем теплоснабжения шахт», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.03 – теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение в научно-исследовательскую работу ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет»

Результаты диссертационных исследований Ткаченко А.Е., а именно математическая модель распределения массовых и энергетических потоков при производстве тепла в водогрейных котлоагрегатах с низкотемпературным кипящим слоем (НТКС), критерии рационального прогнозного управления группой топок НТКС, а также специфические особенности многопараметрического управления производительностью топки НТКС были использована при выполнении научно-исследовательских работ Н-21-2000 «Исследование шахтных теплоэнергетических процессов и создание систем управления» в 2000 - 2005 гг., Н-20-05 «Разработка системы автоматического управления комплексом теплоснабжения с котлоагрегатами низкотемпературного кипящего слоя в условиях переменного расхода теплоносителя» в 2005-2010 гг. и Н-12-17 «Исследование особенностей комплекса теплоснабжения шахты с топками низкотемпературного кипящего слоя и синтез системы автоматического управления производством и распределением тепла» в 2017-2018 гг.

Проректор по научной работе
ГОУ ВПО «Донецкий национальный
технический университет»,
д.т.н., профессор

Ю. Ф. Булгаков

Начальник научно-исследовательской части
ГОУ ВПО «Донецкий национальный
технический университет»
д.т.н., доцент

А.И. Сотников

Заведующий кафедрой
«Горная электротехника и автоматика им. Р.М. Лейбова»
ГОУ ВПО «Донецкий национальный
технический университет»,
д.т.н., профессор

К.Н. Маренич

В диссертационный совет
при ГОУ ВПО «Донбасская национальная
академия строительства и архитектуры»

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по учебной работе
ГОУ ВПО «Донбасская национальная
академия строительства и архитектуры»,
доктор технических наук, профессор
В. И. Нездойминов

«15»

2018 г.

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы
старшего преподавателя кафедры «Горная электротехника и автоматика
им. Р.М. Лейбова»

ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет»

Ткаченко Анны Евгеньевны на тему **«Повышение энергоэкономической
эффективности котлоагрегатов с низкотемпературным кипящим слоем систем
теплоснабжения шахт»**, представленную на соискание ученой степени кандидата
технических наук по специальности 05.23.03 – теплоснабжение, вентиляция,
кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение в учебный процесс
ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

Результаты диссертационных исследований Ткаченко Анны Евгеньевны, а
именно методика поиска рационального состава группы котлоагрегатов с топками
НТКС и производительности каждого котла, модель производства и распределения
материальных и энергетических потоков в котлоагрегате с топкой НТКС, которая
позволяет рассчитывать значения технологических параметров котельных агрегатов
и прогнозировать поведение НТКС в переходных режимах, внедрены в учебный
процесс при чтении курса лекций по дисциплинам «Теплоснабжение» для студентов
направления 08.03.01 «Строительство» профиль «Теплогазоснабжение и
вентиляция», что отражено в учебных программах вышеуказанных дисциплин.

Канд. н. гос. упр., доцент
начальник учебного отдела
Донбасской национальной академии
строительства и архитектуры



А. А. Сухина

Заведующий кафедрой
«Теплотехника, теплогазоснабжение и вентиляция»
Донбасской национальной академии
строительства и архитектуры
д.т.н., профессор



А. В. Лукьянов