

В печать
28.08.18.

Министерство образования и науки
Донецкой Народной Республики
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет»

На правах рукописи



Ткаченко Анна Евгеньевна

УДК 697.326:622.933

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

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Донецк – 2018

Работа выполнена на кафедре горной электротехники и автоматики им. Р.М. Лейбова ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Гавриленко Борис Владимирович,
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет», профессор кафедры горной электротехники и автоматики им. Р.М. Лейбова.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Андрійчук Николай Данилович,
Институт строительства, архитектуры и жилищно-коммунального хозяйства ГОУ ВПО «Луганский национальный университет имени Владимира Даля», директор, заведующий кафедрой вентиляции, теплогазо- и водоснабжения;

кандидат технических наук, доцент
Карнаух Виктория Викторовна,
ГО ВПО «Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского», доцент кафедры холодильной и торговой техники.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова».

Защита состоится «08» ноября 2018 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 01.005.01 при ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры по адресу: 86123, г. Макеевка, ул. Державина, 2, зал ученого совета.
Тел. факс +38 (0623) 22-77-19, e-mail:d01.005.01@donnasa.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры по адресу: 86123, г. Макеевка, ул. Державина, 2 (<http://donnasa.ru>)

Автореферат разослан « ____ » _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 01.005.01

Удовиченко Злата Викторовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Снижение себестоимости производства теплоты для промышленных предприятий, в том числе и шахт, на сегодняшний день является актуальной задачей. Ее решению препятствует использование низкоэффективных теплогенерирующих установок, дорогих видов топлив, а также практика расчета отпуска теплоты по укрупненным показателям. Эта проблема особенно актуальна для шахт, системы теплоснабжения которых характеризуются: локальным снабжением потребителей теплотой от собственной котельной; использованием нескольких теплогенерирующих водогрейных установок; периодическими суточными колебаниями нагрузки на горячее водоснабжение и отопление с амплитудой 5 - 6 МВт; наличие среди потребителей теплоты калориферной установки, характеризуемой большой потребляемой мощностью до 12 МВт на вентиляцию и отсутствием теплоаккумулирующей способности.

Наиболее распространенные на данный момент на шахтах в качестве теплогенерирующих установок слоевые топки отличаются низким КПД, невозможностью оперативного регулирования производительности, длительным розжигом, требованиями к зольности топлива не выше 40%. Поэтому, с учетом тенденции последних десятилетий к удорожанию добычи и снижению качества каменноугольного топлива целесообразно в качестве источников теплоты на шахтах применять топки низкотемпературного кипящего слоя (НТКС). Данная технология позволяет сжигать угли с зольностью до 70%, КПД котлов достигает 83%, возможно автоматическое управление производительностью котлоагрегата с НТКС. Поэтому применение в системах теплоснабжения горных предприятий топок НТКС является актуальным решением проблемы повышения эффективности процесса производства теплоты. Разработка критериев и метода поиска рациональной производительности котлоагрегатов с НТКС, работающих на тепловую сеть шахты, имеет большой научный и практический интерес.

Степень разработанности темы.

Фундаментальные исследования повышения эффективности технологии сжигания твердого топлива в НТКС отражены в работах таких ученых, как О.Ю. Майстренко, Ю.П. Корчевой, Н.В. Чернявский, В.В. Кравцов, Ж.В. Вискин, R. Varon, S. Oka, В.А. Бородуля, Ю.П. Гупало, К.Е. Махорин, П.А.Хинкис и др.

В работах авторов Д.В. Жуков, В.З. Дмитриев, М.Е. Орлов, А.С. Семиненко, А.С. Солдатенков, И.Ю. Козлова, Л.И. Лисенко и др. приведены исследования в сфере повышения эффективности теплоснабжения. Специфика автоматического управления данными объектами изучалась в работах Г.К. Вороновского, Ю.М. Паночишина, А.П. Федорова, Б.А. Коренного, Р. Батинича, Д.Е. Адрианова и др.

Однако, вопросы повышения энергоэффективности систем теплоснабжения шахт изучены мало. Сделан вывод, что на данный момент не существует математической модели производства и распределения теплоты в системе теплоснабжения шахты, которая учитывала бы специфику такого источника теплоты, как котлоагрегат с НТКС. Также, не существует критериев оценки эффективности работы группы котлоагрегатов с НТКС и метода определения

рациональных режимов их работы. 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 «Севергеозкотех-2015», «Севергеозкотех-2016», «Севергеозкотех-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 литературы 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 литературы, 37 страниц приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении к диссертационной работе обоснована актуальность темы, сформулированы цель, основные задачи и методы исследований, раскрыты новизна, теоретическая и практическая ценность полученных результатов, приведены данные о внедрении результатов работы, их апробации и публикации.

В первой главе анализируется современное состояние вопроса по технологии НТКС, типам схем теплоснабжения шахт, управлению производством и распределением теплоты в системе теплоснабжения шахты с топками НТКС.

Проанализированы технологические особенности системы теплоснабжения шахты: наличие собственной котельной установки с несколькими котлоагрегатами; значительная доля тепловой нагрузки на вентиляцию горных выработок, потребляемая калориферной установкой (КА); суточные колебания тепловой нагрузки с амплитудой, сопоставимой с номинальной производительностью котла НТКС малой мощности (до 6 – 7 МВт). Сделан вывод, что данную специфику предприятия необходимо принимать в расчет при реконструкции и проектировании систем теплоснабжения.

Обоснована целесообразность применения в качестве теплогенерирующих установок шахт группы котлоагрегатов с НТКС. Обоснованы рекомендации по применению схемы теплоснабжения шахты, которая включает в себя m источников теплоты - котлоагрегатов с НТКС, работающих на один коллектор и n тепловых абонентов. Источники теплоты и абоненты подсоединены к тепловой сети параллельно. Теплота расходуется на отопление Q_{ot} , вентиляцию Q_{vent} , горячее водоснабжение $Q_{g.vsn}$, проветривание горных выработок КА Q_{kal} , а также компенсацию потерь теплоты в трубопроводной сети $Q_{pot.tr}$.

Обоснована целесообразность оперативного регулирования производительности котельной по прогнозному тепловому спросу шахтных абонентов. Тогда задание по суммарной производительности группы котлоагрегатов с НТКС с учетом КПД каждого котла $\eta_{k.a.i}$ определяется как

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

где $Q_{k.a.i}$ – производительность каждого котла с НТКС, Вт.

Котлоагрегаты с НТКС могут быть оборудованы погружными поверхностями нагрева (ППН), экранными поверхностями нагрева (ЭПН), конвективными поверхностями нагрева (КПН), экономайзером (ЭК). Зависимость КПД котла с НТКС от производительности нелинейная, для каждого агрегата уникальна и меняется в процессе эксплуатации установки. Регулировать

производительность котлов с НТКС можно несколькими способами – расходом топлива, расходом дутьевого воздуха, степенью введения ППН в слой, или комбинируя эти способы. Топка НТКС может находиться в трех состояниях – в работе, остановлена и в «горячем» резерве. Следовательно, возможно полное автоматическое управление работой котла с НТКС с применением указанных способов оперативного регулирования его производительности. Данные технологические особенности обуславливают целесообразность внедрения прогнозного управления суммарной производительностью группы котлоагрегатов и выбора ее рационального состава.

Обоснована целесообразность использования котлов с НТКС в качестве источников теплоты в шахтной системе теплоснабжения, а также необходимость разработки системы автоматического управления производством теплоты группой котлоагрегатов с НТКС на основании прогнозного теплового спроса

Во второй главе разработана математическая модель производства и распределения теплоты в котлоагрегате с НТКС. При структурной и параметрической идентификации котлоагрегата с НТКС за основу приняли уравнения тепловых балансов, характеризующие распределение массовых и тепловых потоков в котле. Массовый баланс топки НТКС на единицу времени τ , с

$$dm_{ks} / d\tau = m_{ugol}(\tau) + m_{d.v}(\tau) - m_{zoli}(\tau) - m_{p.sg}(\tau) - m_{is.vz}(\tau), \quad (2)$$

где 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 из слоя дутьевого воздуха, кг/с.

Уравнение теплового баланса котла с НТКС на 1 кг внесенного топлива

$$Q_{ks} = Q_{ugol} + Q_{d.v} - Q_{ppn}^{ks} - Q_{ppn}^{ug} - Q_{ek} - Q_{epn} - Q_{kpn} - Q_{h.n.} - Q_{f.n.} - Q_{f.sh} - Q_{oh} - Q_{p.sg} - Q_{is.vz}, \quad (3)$$

где Q_{ugol} – теплота, полученная при сгорании твердого топлива, Дж/кг; $Q_{d.v}$ – теплота, внесенная с физической теплотой дутьевого воздуха, Дж/кг; Q_{ppn}^{ks} , Q_{ppn}^{ug} – теплота, воспринятая ППН за счет теплообмена с кипящим слоем и с продуктами сгорания, соответственно, Дж/кг; Q_{epn} – теплота, воспринятая ЭПН, Дж/кг; Q_{kpn} – теплота, воспринятая КПН, Дж/кг; Q_{ek} – теплота, воспринятая экономайзером, Дж/кг; $Q_{h.n.}$ – потери теплоты с химическим недожогом, Дж/кг; $Q_{f.n.}$ – потери теплоты с физическим недожогом, Дж/кг; $Q_{f.sh}$ – потери теплоты с физической теплотой шлаков, Дж/кг; Q_{oh} – потери теплоты за счет внешнего охлаждения, Дж/кг; $Q_{p.sg} + Q_{is.vz} = Q_{atm}$ – потери теплоты в атмосферу вместе с продуктами сгорания и исходящим непрореагировавшим воздухом, соответственно, Дж/кг.

Теплота, полезно расходуемая котлом на нагрев теплоносителя

$$Q_{pol} = Q_{ppn} + Q_{ek} + Q_{epn} + Q_{kpn} = Gc_v(t_v^n - t_v^o), \quad (4)$$

где Q_{ppn} – полная теплота, воспринимаемая ППН, Вт; G – расход воды в системе, кг/с; c_v – удельная теплоемкость воды, Дж/(кг·К); t_v^n – температура воды на выходе из котла, °С; t_v^o – температура холодной воды на входе в циркуляционную систему котла, °С.

Теплота, воспринимаемая ППН

$$Q_{ppn} = Q_{ppn}^{ks} + Q_{ppn}^{ug} = F_{ppn} k_{ks} k_{ppn}^{ks} (t_{ks} - t_v^o) + \sigma_0 \alpha_{ppn}^{ks} F_{ppn} k_{ks} \left(\left(\frac{273 + t_{ks}}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + t_v^o}{100} \right)^4 \right) + (5)$$

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

где F_{ppn} – площадь теплообмена ППН, м²; k_{ks} – коэффициент погружения ППН в слой; k_{ppn}^{ks} , α_{ppn}^{ks} – коэффициенты конвективного и лучевого теплообмена НТКС с ППН, Дж/(м²·К), Дж/(м²·К⁴); t_{ks} – температура кипящего слоя, °С; k_{ppn}^{ug} , α_{ppn}^{ug} – коэффициенты конвективного и лучевого теплообмена уходящих газов с ППН, Дж/(м²·К) и Дж/(м²·К⁴). Теплота, воспринимаемая ЭПН, частично передается путем конвективного теплообмена Q_{epn}^k , частично излучением Q_{epn}^l

$$Q_{epn} = Q_{epn}^k + Q_{epn}^l = F_{epn} k_{epn}^{ug} (t_{ks} - t_{epn}^v) + \sigma_0 F_{epn} \alpha_{ppn}^{ks} \left(\left(\frac{273 + t_{ks}}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + t_{epn}^v}{100} \right)^4 \right), (6)$$

где k_{epn}^{ug} – коэффициент конвективного теплообмена ЭПН с уходящими газами, Дж/(м²·К); F_{epn} – площадь теплообмена ФЭПН, м²; t_{epn}^v – средняя температура воды в ЭПН, °С. Теплота, воспринимаемая КПН

$$Q_{kpn} = F_{kpn} k_{kpn}^{ug} (t_{kpn}^{ug} - t_{kpn}^v), (7)$$

где k_{kpn}^{ug} – коэффициент конвективного теплообмена КПН с уходящими газами; F_{kpn} – площадь теплообмена КПН, м²; t_{kpn}^v – средняя температура воды в КПН, °С. Теплота, воспринимаемая экономайзером

$$Q_{ek} = F_{ek} k_{ek}^{ug} \Delta t_{ek}, (8)$$

где k_{ek}^{ug} – коэффициент конвективного теплообмена ЭК с уходящими газами, Дж/(м²·К); F_{ek} – площадь теплообмена ЭК, м²; Δt_{ek} – средняя разность температур воды в ЭК и уходящих газов, °С.

Тогда, в дифференциальном виде энергетический баланс котлоагрегата с НТКС предстанет в виде

$$\frac{m_{ks} \cdot dI_{ks}(\tau)}{d\tau} = m_{ugol}(\tau) Q_n^p - Q_{dv}(\tau) - m_z(\tau) c_z t_z - k_{h.n} m_{ugol}(\tau) Q_n^p - Q_{oh}(\tau) - Q_{ppn}^{ug}(\tau) - Q_{epn}(\tau) - Q_{kpn}(\tau) - (9)$$

$$- Q_{ek}(\tau) - F_{ppn} k_{ks} K_{ppn}^{ks} [t_{ks}(\tau) - t_v^o(\tau)] - F_{ppn} k_{ks} \alpha_{ppn}^{ks} \left(\left(\frac{273 + t_{ks}(\tau)}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + t_v^o(\tau)}{100} \right)^4 \right) - m_{psg} I_{psg}(\tau) - m_{is.vz} I_{is.vz}(\tau),$$

где I_{ks} – энтальпия кипящего слоя, Дж/кг; Q_n^p – низшая теплота сгорания 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 в НТКС, %.

Уравнения (4) – (9) при переходе к операторному виду путем применения преобразования Лапласа позволяют синтезировать динамическую модель получения и распределения тепловых потоков в котлоагрегате с НТКС. При начальных условиях и наложенных технологических ограничениях

$$t_{ks}(0) = t_{ks}^0; m_{ugol}(0) = m_{ugol}^0; m_{dv}(0) = m_{dv}^0; k_{ks}(0) = k_{ks}^0; (10)$$

$$t_{ks}^{\min} \leq t_{ks} \leq t_{ks}^{\max}; 0 \leq m_{ugol} \leq m_{ugol}^{\max}; m_{dv}^{\min} \leq m_{dv} \leq m_{dv}^{\max}; 0 \leq k_{ks} \leq 1,$$

где t_{ks}^0 , m_{ugob}^0 , m_{dv}^0 , k_{ks}^0 – соответственно, исходные значения: температуры НТКС, $^{\circ}\text{C}$; 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_{ugob}^{\max} ; m_{dv}^{\min} и m_{dv}^{\max} – соответственно, минимальная и максимальная температуры существования НТКС, $^{\circ}\text{C}$; максимально возможный по техническим характеристикам забрасывателя расход угля, кг/с; минимальный и максимальный расходы дутьевого воздуха, необходимые для поддержания НТКС в псевдооживленном состоянии, кг/с.

На рисунке 1 представлена структура котлоагрегата с НТКС со всеми поверхностями нагрева, реализующая все три способа регулирования его производительности. Все входные и выходные величины в модели рассчитываются на единицу времени. На рисунке 1 приняты условные обозначения: V_{tt} и V_{dv} – объемные расходы твердого топлива и дутьевого воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$; $Q'_{ks}(V_{tt})$ – количество теплоты, вносимое в слой с твердым топливом, Вт; $Q''_{ks}(V_{dv})$ – количество теплоты, отводимое из слоя с дутьевым воздухом, Вт; Q_{ks} – количество теплоты, получаемое слоем в единицу времени, Вт; t_v^{ek} – температура воды после ЭК, $^{\circ}\text{C}$; $t_v^{ppn+epn}$ – температура воды после ППН и ЭПН, $^{\circ}\text{C}$; t'_{ug} , t''_{ug} и t_{ug} – температуры уходящих газов после ЭПН, КПН и на выходе из котла, соответственно, $^{\circ}\text{C}$; t_v^o , t_v^n – температуры воды на входе и выходе из котла, соответственно, $^{\circ}\text{C}$; V_{ug} – расход уходящих дымовых газов, $\text{м}^3/\text{с}$. Q_{atm} – потери тепла в атмосферу вместе с уходящими газами, Вт.

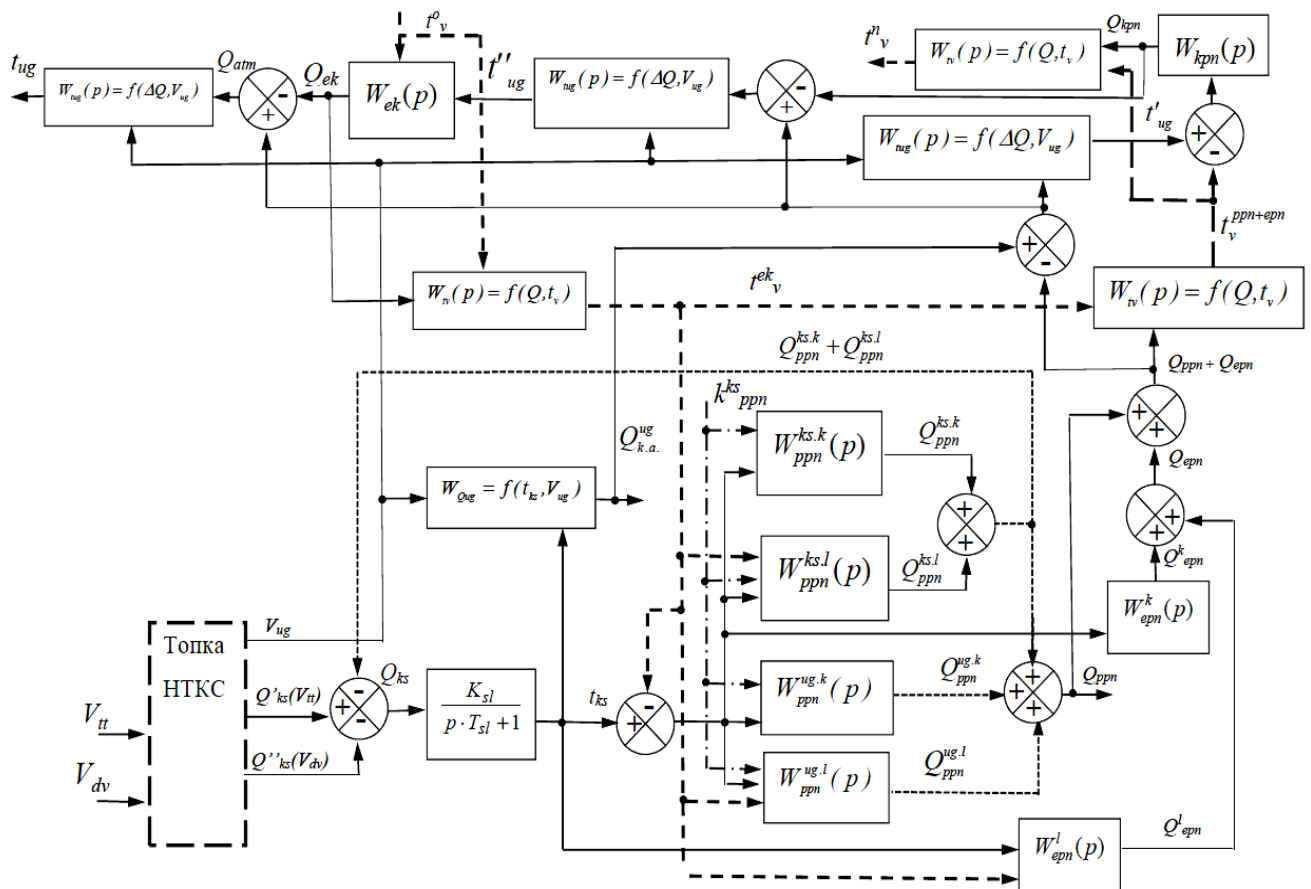


Рис. 1. Структура модели водогрейного котлоагрегата с топкой НТКС с учетом параметров поверхностей нагрева

Передаточные функции структурных элементов котлоагрегата (Рис. 1) представлены в следующем виде $W_{t_{ks}}^{Q_{ks}}(p) = \frac{K_{sl}}{T_{sl}p + 1}$ – передаточная функция по каналу изменения температуры слоя t_{ks} от количества полученной теплоты (K_{sl} – передаточный коэффициент по температуре слоя, T_{sl} – постоянная времени, определяющая длительность переходного процесса); $W_{ppn}^{ks,k}(p), W_{ppn}^{k,l}(p), W_{ppn}^{ug,k}(p), W_{ppn}^{ug,l}(p)$ – передаточные функции тепловосприятия ППН по четырем каналам, соответственно: при конвективном теплообмене НТКС с погруженной частью ППН (количество воспринятой теплоты – $Q_{ppn}^{ks,k}$, Вт), при лучевом теплообмене НТКС с погруженной частью ППН (количество воспринятой теплоты – $Q_{ppn}^{ks,l}$, Вт), при конвективном теплообмене уходящих газов с непогруженной частью ППН (количество воспринятой теплоты – $Q_{ppn}^{ug,k}$, Вт), при лучевом теплообмене уходящих газов с непогруженной частью ППН (количество воспринятой теплоты – $Q_{ppn}^{ug,l}$, Вт), полное тепловосприятие ППН – Q_{ppn} , Вт; $W_{Q_{ug}} = f(t_{ks}, V_{ug})$ – передаточная функция по количеству воспринятой от слоя уходящими газами теплоты, $Q_{k.a.}^{ug}$ – теплота воспринятая уходящими газами, Вт; $W_{epn}^k(p), W_{epn}^l(p), W_{kpn}(p), W_{ek}(p)$ – передаточные функции по тепловосприятию: ЭПН при конвективном теплообмене с уходящими газами (количество воспринятой теплоты – Q_{epn}^k , Вт), ЭПН при лучевом теплообмене с НТКС (количество воспринятой теплоты – Q_{epn}^l , Вт), КПН (количество воспринятой теплоты – Q_{kpn} , Вт) и ЭК (количество воспринятой теплоты – Q_{ek} , Вт), соответственно; передаточные функции вида $W_{tv} = f(Q, t_v)$, определяющие значение температуры воды на выходе из поверхности нагрева; передаточные функции вида $W_{ug} = f(\Delta Q, V_{ug})$, определяющие значения температур уходящих газов после поверхностей нагрева.

В результате компьютерных исследований были получены следующие графики переходных процессов в котле с НТКС (Рис. 2 и Рис. 3).

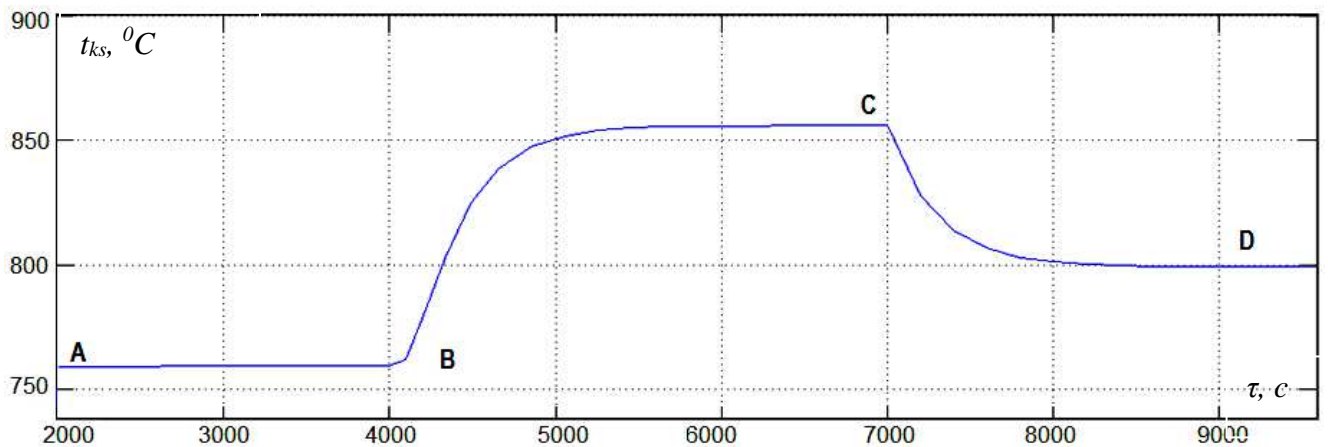


Рис. 2. График переходного процесса изменения температуры НТКС во времени $t_{ks} = f(\tau)$

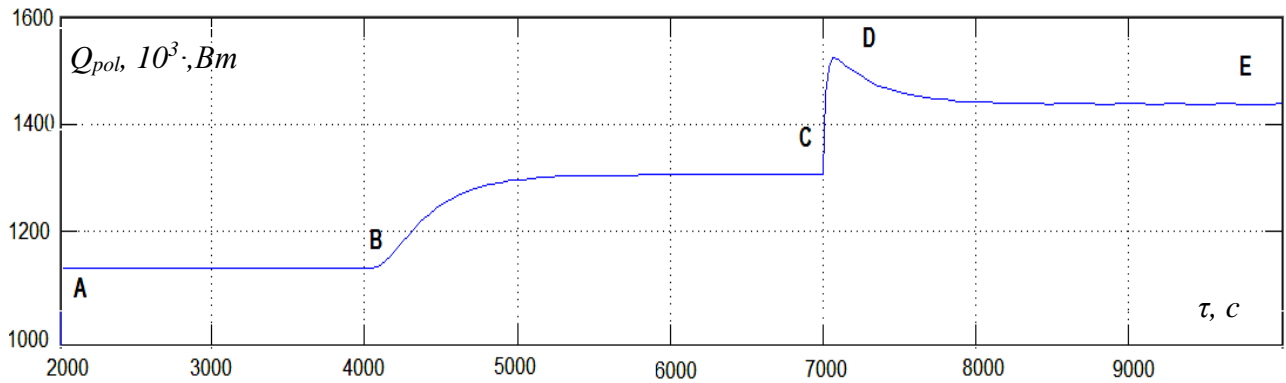


Рис. 3. График переходного процесса изменения производительности котлоагрегата с НТКС $Q_{pol} = f(\tau)$

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 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 3 участок ВС характеризует аналогичное нарастанию температуры НТКС нарастание производительности котла, участок CDE – характеризует нелинейное с перерегулированием (вершина D) возрастание производительности котлоагрегата при увеличении V_{dv} .

Разработанная модель позволяет при компьютерном моделировании прогнозировать поведение слоя при различных комбинациях управляющих воздействий при переходе с одного режима работы котлоагрегата с НТКС на другой, что является основой для синтеза системы автоматического управления. На основании данной математической модели также стало возможным рассчитывать значения технологических параметров котлов с НТКС исходя из их тепловой производительности и определять вид рекомендуемой для промышленного использования зависимости $\eta_{k.a.i} = f(Q_{pol.i})$ по каждому агрегату.

Предложенная модель является основой для реализации метода расчета рациональных тепловых производительностей котельных агрегатов при их работе в группе для автоматизации процесса производства теплоты.

В третьей главе изложены результаты проведенного натурального эксперимента. Эксперименты по исследованию динамических свойств топки НТКС выполнены в условиях котельной установки шахты 4-21 ГП «Шахтоуправление «Южнодонецкое» №1» (г. Донецк). На рисунке 4 представлена принципиальная схема экспериментальной установки с указанием средств отбора информации. По результатам исследований была реализована структурная и параметрическая идентификация элементов котлоагрегата с НТКС, а также подтверждена адекватность разработанной матмодели.

Оценка адекватности разработанной математической модели включала: регистрацию значений температуры НТКС в переходных режимах при нормальной работе топки; обработку результатов исследований и получение необходимых характеристик для оценки соответствия модели и объекта исследований; получение динамических характеристик топки НТКС с использованием разработанной модели в тех же условиях, что и при экспериментальных исследованиях; определение дисперсии воспроизводимости экспериментальных значений; определение дисперсии адекватности реальным полученными динамическими характеристиками и процессами, полученными в результате моделирования; проверку однородности дисперсии адекватности с использованием критерия Фишера.

Исследования предполагали непрерывные измерения с ручной регистрацией температуры НТКС и производительности дутьевого вентилятора, а также оценку производительности забрасывателя по уровню твердого топлива в бункере. Все этапы программы экспериментальных исследований выполнялись в процессе естественной работы топки. Ступенчатые воздействия по производительности забрасывателя и дутьевого вентилятора формировались в режиме ручного управления на величину, не выводящую температуру в топочном пространстве за пределы существования кипящего слоя.

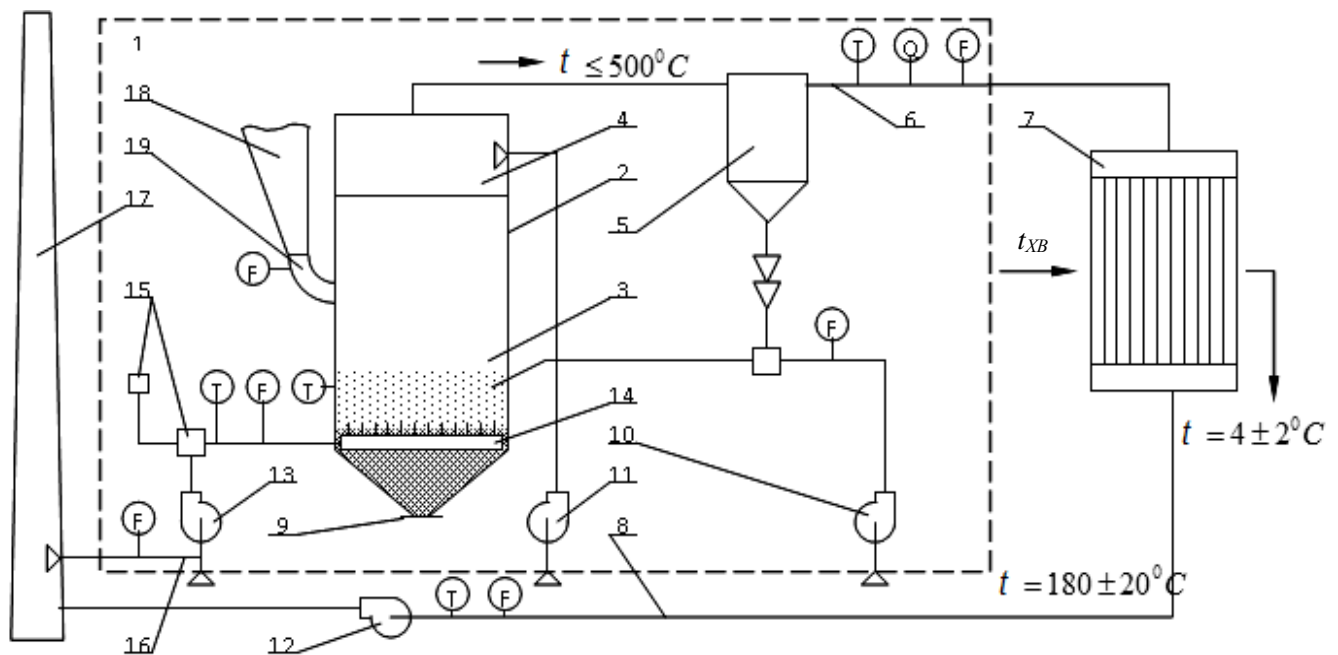


Рис. 4. Принципиальная схема экспериментальной установки

На рисунке 4 приняты условные обозначения: 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_{XB} – температура холодного воздуха.

Экспериментальные характеристики изменения температуры НТКС при ступенчатых воздействиях по производительности забрасывателя (Рис. 5) и дутьевого вентилятора (Рис. 6) представлены со сдвигом по времени в 4000 с, что вызвано отработкой в математической модели процесса розжига топki.

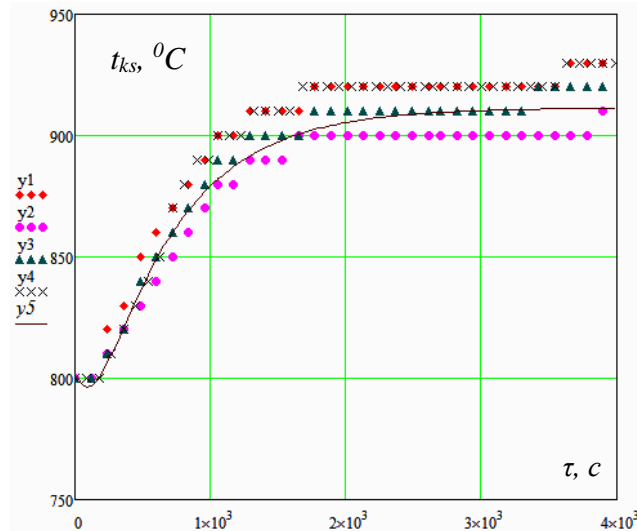


Рис. 5. Изменения температуры НТКС при ступенчатом воздействии по производительности забрасывателя (характеристики y_1 – y_4) и результатов моделирования (характеристика y_5)

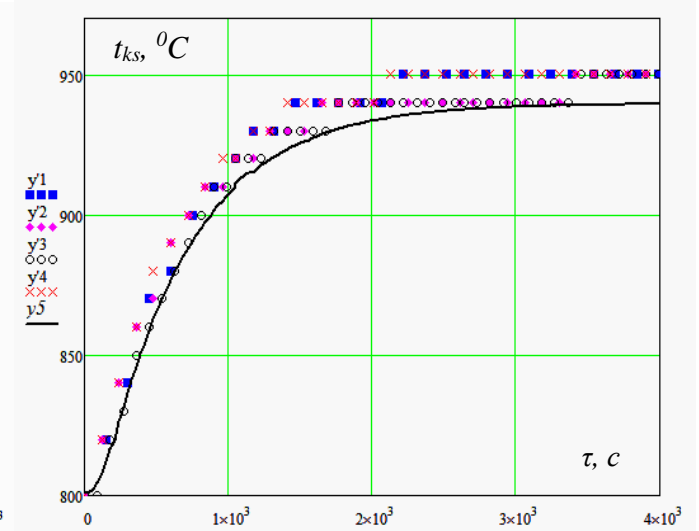


Рис. 6. Изменения температуры НТКС при ступенчатом воздействии по производительности дутьевого вентилятора (характеристики y_1 – y_4) и результатов моделирования (характеристика y_5)

Эксперимент проводился при следующих условиях:

1) при ступенчатом воздействии по производительности забрасывателя (Рис. 6) начальная температура НТКС $t_{ks} = 800^{\circ}\text{C}$; начальный объемный расход твердого топлива $V_{tt} = 0,29 \text{ м}^3/\text{ч}$; изменение объемного расхода твердого топлива $\Delta V_{tt} = 0,04 \text{ м}^3/\text{ч}$;

2) при ступенчатом воздействии по производительности дутьевого вентилятора (Рис. 7) начальная температура НТКС $t_{ks} = 800^{\circ}\text{C}$; начальный объемный расход дутьевого воздуха $V_{dv} = 1 \text{ м}^3/\text{с}$; изменение объемного расхода дутьевого воздуха $\Delta V_{dv} = -0,2 \text{ м}^3/\text{с}$.

Из результатов эксперимента следует, что разработанная модель топki НТКС при уровне доверительной вероятности 0,95 адекватна реальным процессам в котлоагрегате.

Также результаты эксперимента позволили идентифицировать вид передаточных функций топki НТКС при различных управляющих воздействиях, что было использовано при построении компьютерной модели котлоагрегата.

В четвертой главе разработан метод поиска рационального состава группы котельных агрегатов с НТКС, а также их производительности в зависимости от

теплового спроса; обоснован критерий эффективной работы группы котлоагрегатов с НТКС.

Для осуществления оперативного регулирования производительности шахтной котельной необходимо своевременно прогнозировать изменения теплового спроса. Для его прогноза необходимо в автоматическом режиме рассчитывать для каждого j -го абонента часовые расходы теплоты на отопление, вентиляцию, горячее водоснабжение и калориферную установку, соответственно. Задание по суммарной производительности группы котлов с НТКС с учетом КПД каждого котлоагрегата определяется из выражения (1).

В качестве критерия рациональной работы группы котлов с НТКС, принят критерий максимального средневзвешенного КПД при выполнении условия (1)

$$\eta(\{Q_{k.a.i}\}) = \sum_{i=1}^m (\eta_{k.a.i} \cdot Q_{k.a.i}) / \sum_{i=1}^m Q_{k.a.i} \rightarrow \max, \quad (11)$$

где $\{Q_{k.a.i}\} = \{Q_{k.a.1}, Q_{k.a.2}, \dots, Q_{k.a.m}\}$ – вектор полной производительности всех m агрегатов, Вт, при наложенных ограничениях по удовлетворению прогнозного теплового спроса и по диапазону рабочей производительности (12)

$$\sum_{i=1}^m (Q_{k.a.i} \cdot \eta_{k.a.i}) \geq Q_{ust} \quad \text{и} \quad Q_{k.a.i}^{\min} \leq Q_{k.a.i} \leq Q_{k.a.i}^{\max}, i = 1 \dots m. \quad (12)$$

Также должна учитываться целесообразность изменения числа работающих котлов с НТКС путем розжига, останова или задействования «горячего» резерва по критерию минимума расхода условного топлива

$$B^{usl}(\{Q_{k.a.i}\}) = \sum_{i=1}^m B_i^{usl}(Q_{k.a.i}) = \sum_{i=1}^m E \cdot B_i(Q_{k.a.i}) \rightarrow \min, \quad (13)$$

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

По временным затратам наложены ограничения

$$\Delta\tau_{pp,i} \rightarrow \Delta\tau_{ust} \pm \Delta\tau_{pogr}^{dop}, \quad (14)$$

из которых следует, что время переходного процесса каждого i -го котла $\Delta\tau_{pp,i}$, с, от исходного состояния котла (в работе, в «горячем» резерве, отключен) до момента, когда будет достигнуто условие (1), должно соответствовать промежутку времени $\Delta\tau_{ust}$, с, за который фактический тепловой спрос достигнет значения, определенного в задании (1) с учетом возможной погрешности $\Delta\tau_{pogr}^{dop}$, с.

В процессе определения рационального режима работы котельной установки необходимо определить $(m-1)$ переменных $Q_{k.a.i}$, Вт, где $i=1, \dots, (m-1)$

$$Q_{k.a.m} = Q_{ust} - \sum_{i=1}^{m-1} Q_{k.a.i}. \quad (15)$$

Следовательно, целесообразно разработать метод поиска таких технологических параметров группы котлоагрегатов с НТКС, которые обеспечивали бы выполнение условий (1), (11) – (15). При этом следует учитывать, что выполнение условия (1) можно обеспечить при работе разного числа котельных агрегатов.

На рисунке 7 представлена усредненная зависимость КПД 4-х однотипных котельных агрегатов с НТКС $\eta_{k.a.} = f(Q_{pol}, m)$ от их полезной производительности и количества работающих единиц ($m=1...4$).

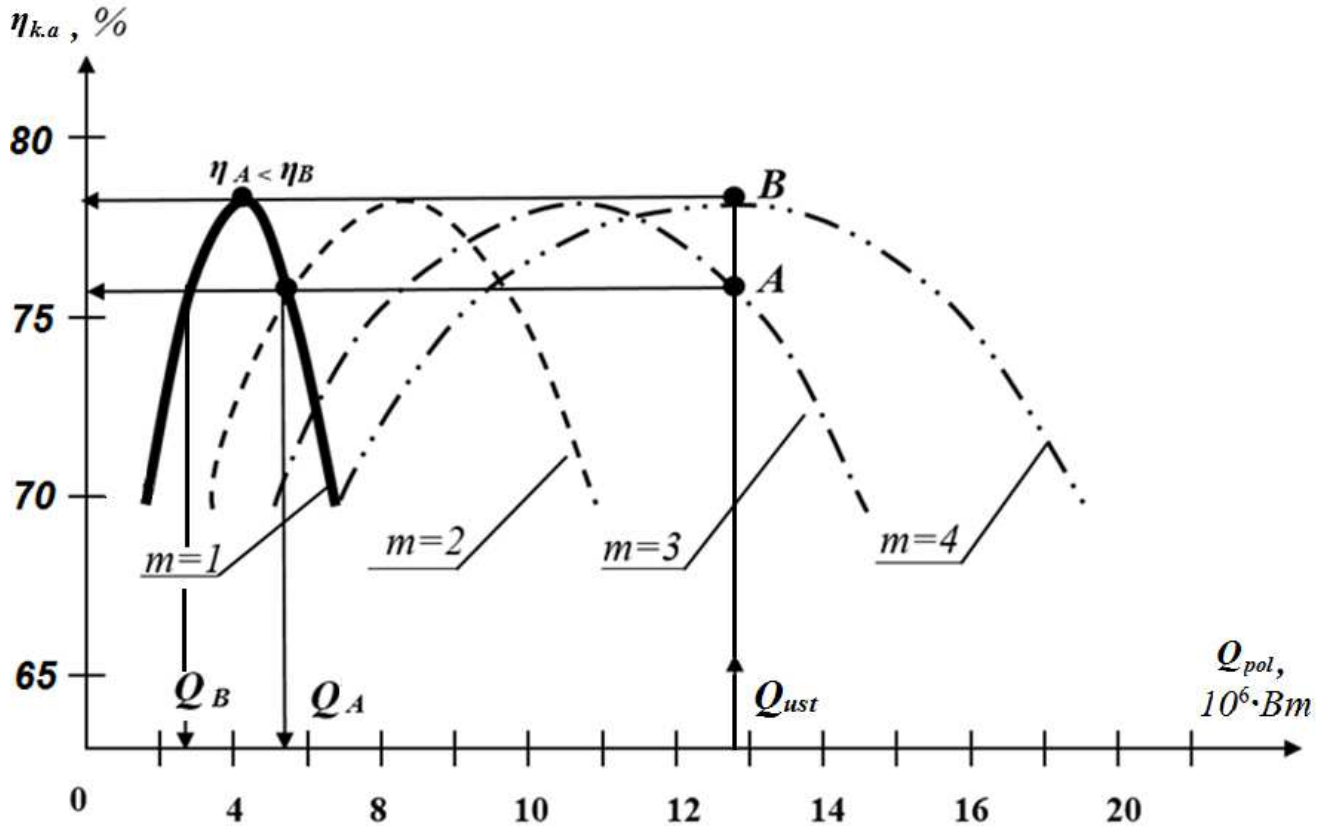


Рис. 7. Зависимости КПД котельных агрегатов от их производительности

Требуемую производительность Q_{ust} можно получить при работе как трех, так и четырех котельных агрегатов (точки A и B, соответственно). Поскольку данным точкам соответствуют различные КПД работы котлов, то более эффективным будет режим B одновременной работы четырех котельных агрегатов, поскольку средневзвешенный КПД установок при этом выше $\eta_A < \eta_B$.

Исходя из того, что характеристики $\eta_{k.a.i} = f(Q_{pol,i})$ котельных агрегатов на практике имеют разный вид, количество кривых, описывающих все комбинации совместной работы котлов, будет увеличиваться, а задача поиска рационального состава и производительности котельных агрегатов значительно усложнится.

Для ее решения разработан метод поиска рационального состава группы котлов и производительности каждого котлоагрегата с НТКС по критерию (11).

Исходными данными для расчета являются:

1) Вектор текущих параметров каждого котлоагрегата с НТКС, как то, состояние, производительность и др. технологические параметры;

2) Совокупность векторов значений технологических параметров каждого котлоагрегата с НТКС: производительности i -го котла с НТКС, соответствующими этой производительности расходом твердого топлива, расходом дутьевого воздуха, степенью погружения в слой ППН, а также КПД i -го котла при данных

параметрах, т.е. множество точек, характеризуемых соответствующими координатами $[Q_{k.a.i}; B_{п.и.}; v_{dv.i.}; k_{ksi.}; \eta_{k.a.i.}]$. 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.

3) 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 $\eta_{k.a.i} = f(Q_{pol.i})$ 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 математической модели котлоагрегата с НТКС, которая лежит в основе расчета.

Последовательность расчета рациональных параметров группы котлоагрегатов НТКС представлена в виде алгоритма (Рис. 9). 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 математической модели (количеством технологических параметров учитываемых при расчете полей значений $Q_{k.a.}$ (или Q_{pol})).

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.

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

$$\sum_{i=1}^k Q_{k.a.i}^{\min} \leq \sum_{i=1}^k Q_{k.a.i} \leq \sum_{i=1}^k Q_{k.a.i}^{\max}, \quad (16)$$

где k – количество работающих котлов в данной комбинации. При выполнении условия (16) для данной комбинации осуществляется подпрограмма вычисления средневзвешенного КПД, а также расчет материальных затрат для перехода из исходного состояния к рассматриваемому варианту по критериям (9), (12).

Далее осуществляется поиск рационального состава и производительности котлоагрегатов с НТКС, основанный на применении численного метода «прямые выборочные процедуры с уменьшением интервала поиска». В течение поиска вектору искомым 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 и минимально возможного расхода условного топлива, а также значения соответствующих технологических параметров каждого котла с НТКС.

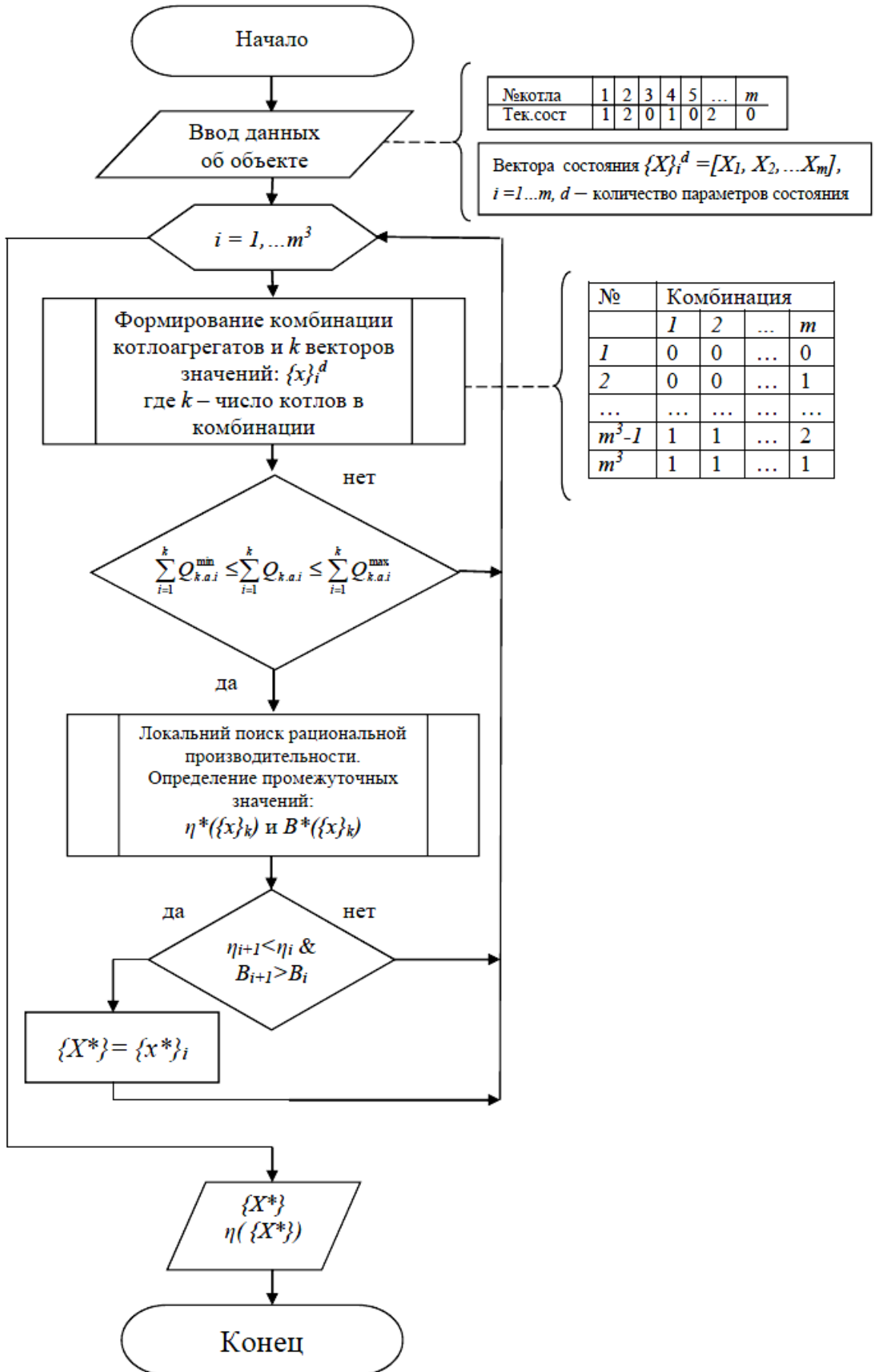


Рис. 9. Обобщенный алгоритм поиска рационального состава группы котлоагрегатов с НТКС и производительности каждого котла

Так, предложен метод расчета параметров рациональной работы группы котлоагрегатов с НТКС. Результатами являются рекомендации по составу группы котлов, находящихся в работе, и их текущих производительностей. Применение данного метода позволяет повысить средневзвешенный КПД группы котлоагрегатов на 2 - 4%.

В пятой главе разработаны алгоритм работы и структурная схема системы автоматического управления производством теплоты в системе теплоснабжения шахты (Рис.10). Определены типы датчиков технологических параметров, вид промышленного компьютера для реализации системы автоматического управления (САУ) высшего уровня, разработаны схмотехнические решения локальных регуляторов производительности котлоагрегатов с НТКС на современной элементной базе. Разработана принципиальная электрическая схема блока согласования выходных сигналов датчиков со входами регулятора технологических параметров топки НТКС типа ТРМ148.

Также выполнено технико-экономическое обоснование эффективности внедрения разработанной САУ на примере группы котлоагрегатов типа КВКС-3,489 с топкой НТКС. В результате внедрения в производственный процесс проектируемой системы автоматического управления ожидаемая годовая экономия условного топлива по одному котлоагрегату составит 54,9 т.у.т./год, экономический эффект более 140 тыс. руб/год.

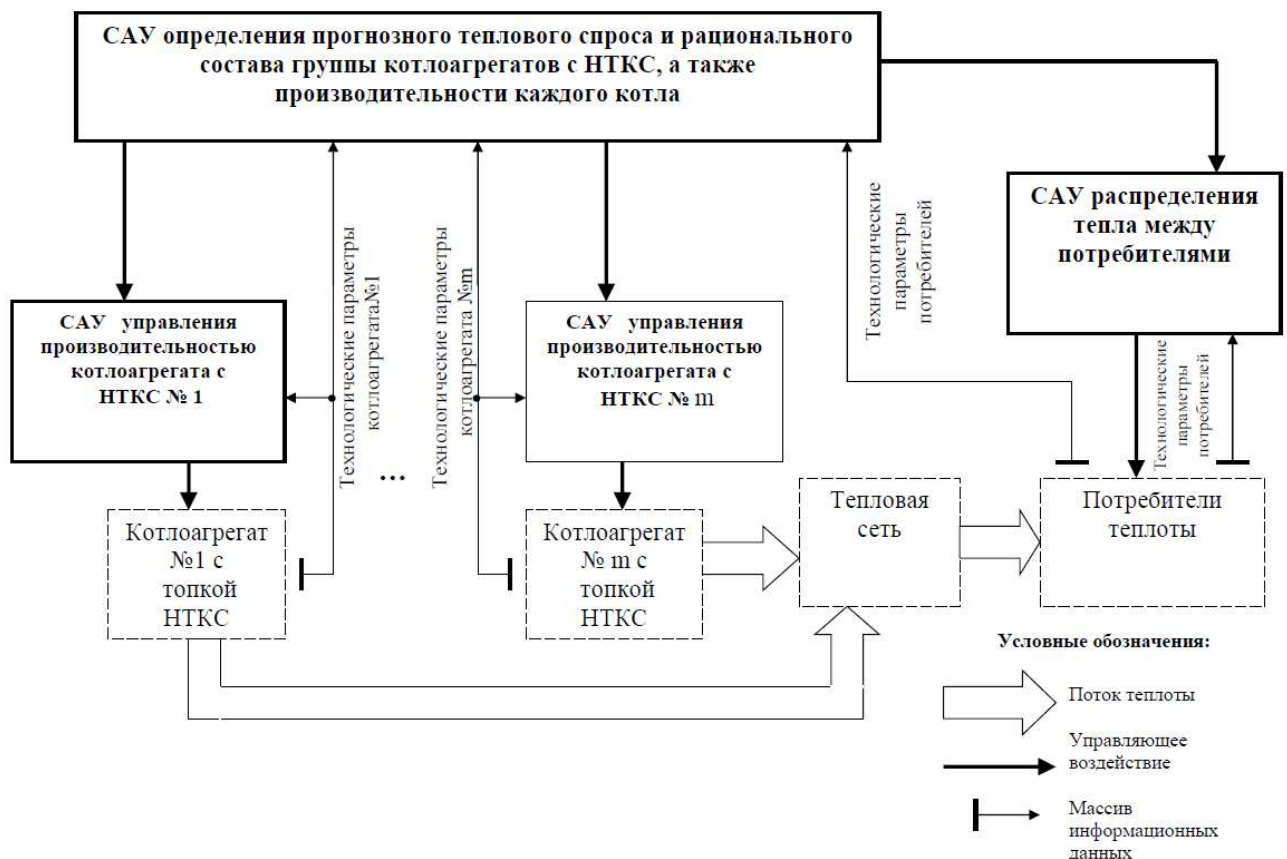


Рис. 10. Обобщенная структурная схема системы автоматического управления производством теплоты в системе теплоснабжения шахты

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

Основные научные выводы и результаты работы:

– 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 ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- в рецензируемых научных изданиях, рекомендуемых Министерством образования и науки Украины:

1. Гавриленко, Б.В. Критерії керування шахтною системою теплопостачання з топками НТКШ [Текст] / Б.В. Гавриленко, **Г.Є. Ткаченко** // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Гірничо-електромеханічна». Випуск 83. – Донецьк: ДонНТУ, 2004. - С. 58–63.

2. Гавриленко, Б.В. Моделювання роботи системи автоматичного управління топкою низькотемпературного киплячого шару [Текст] / Б.В. Гавриленко, **Г.Є. Ткаченко** // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Гірничо-електромеханічна». Випуск 101. – Донецьк: ДонНТУ, 2005. – С. 24 – 31. (*Разработана система автоматического управления производительностью топки НТКС*).

3. Гавриленко, Б.В. Постановка задачі керування комплексом теплопостачання шахти з топками КШ [Текст] / Б.В. Гавриленко, **Г.Є. Ткаченко** // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Гірничо-електромеханічна». Випуск 104. – Донецьк: ДонНТУ, 2006. – С.42–46. (*Разработаны целевые функции управления топкой НТКС*).

4. Гавриленко, Б.В. Вибір критеріїв ефективного управління системою теплопостачання шахти [Текст] / Б.В. Гавриленко, **Г.Є. Ткаченко** // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Випуск 12 (113), серія гірничо-електромеханічна. – Донецьк: ДонНТУ, 2006. – с.47 – 52.

5. Гавриленко, Б.В. Синтез математичної моделі комплексу теплопостачання шахти з топками киплячого шару [Текст] / Б.В. Гавриленко, **Г.Є. Ткаченко** // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Випуск 14 (127), серія гірничо-електромеханічна. – Донецьк, ДВНЗ «ДонНТУ». – 2007. – С. 46 – 51. (*Разработана математическая модель топки НТКС*).

6. **Ткаченко, Г.Є.** Критерії оптимального управління роботою топків НТКС при їх сумісній роботі на теплову мережу [Текст] / Г.Є. Ткаченко, // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. – Мелітополь: ТДАТУ, 2008. – Вип. 8. Т. 10. – С. 124–128. (*Разработаны критерии оптимального управления работой группы топков НТКС*).

- в рецензируемых научных изданиях, рекомендуемых Министерством образования и науки ДНР:

7. **Ткаченко, А.Е.** Методи ефективного теплоснабження шахти при експлуатації котлоагрегатів низкотемпературного киплячого слоя [Текст] / А.Е. Ткаченко, Б.В. Гавриленко, С.В. Неежмаков // Вестник Института гражданской защиты Донбасса: научный журнал. – Донецк: ДонНТУ, 2016. – Вип. 4 (8). – С. 31–39. (*Обоснованы методы повышения эффективности системы теплоснабжения шахты за счет эксплуатации топков НТКС; предложены критерии эффективной работы группы котлоагрегатов НТКС*).

8. **Ткаченко, А.Е.** Математическое моделирование энергообмена в шахтном комплексе теплоснабжения с топками низкотемпературного киплящего слоя [Текст] / А.Е. Ткаченко // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. «Инженерные системы и техногенная безопасность». – 2016. - №5 (121). – С. 42–49.

9. **Ткаченко, А.Е.** Определение параметров рационального функционирования группы котлоагрегатів НТКС на тепловую сеть шахты [Текст]/ А.Е. Ткаченко // Вестник Академии гражданской защиты: научный журнал. – Донецк: ДонНТУ, 2017. – Вип. 4 (12). – С. 63–72.

- в других изданиях:

10. Гавриленко, Б.В. Критерии автоматического управления комплексом теплоснабжения шахты с топками киплящего слоя [Текст] / Б.В. Гавриленко, **А.Е. Ткаченко** // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-20: XX Междунар. науч. конф. Ярославль, 28-31 мая 2007 г. – Ярославль, 2007. – Т.7. – С. 291–293.

11. Гавриленко, Б.В. Математическая модель комплекса теплоснабжения с топками киплящего слоя [Текст] / Б.В. Гавриленко, **А.Е. Ткаченко** // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-21: XXI Междунар. Науч. Конф. Саратов, 27-30 мая 2008 г. – Саратов, 2008. – Т.5. - С. 101–103.

12. **Ткаченко, А.Е.** Обоснование критерия управления рациональным режимом работы группы котлоагрегатів низкотемпературного киплящего слоя [Текст] / А.Е. Ткаченко // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика: Сборник научных трудов по материалам международной заочной научно-практической конференции. – № 7. Часть 3 (18-3). – Воронеж, ФГБОУ ВО «ВГЛТУ», 2015. – С. 58–61.

13. Токарев О.В. Критерии оптимальной совокупной работы топок низкотемпературного кипящего слоя на тепловую сеть [Текст] / 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. – Донецк: ДонНТУ, 2015. – С. 199–202.

14. **Ткаченко, А.Е.** Синтез динамической модели котельного агрегата низкотемпературного кипящего слоя [Текст] / 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.

15. **Ткаченко, А.Е.** Особенности системы автоматического управления шахтными котельными установками [Текст] / 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.

16. **Ткаченко, А.Е.** Разработка и исследование динамической модели тепло-массообменных процессов в комплексе теплоснабжения шахты с топками низкотемпературного кипящего слоя [Текст] / А.Е. Ткаченко // XVII Международная молодежная конференция «Севергеоэкотех-2016»: Материалы конференции (23-25 марта 2016). В 6 ч. Ч.1. – Ухта: УГТУ, 2016. – С. 55–57.

17. Крюков, А.В. Критерии управления шахтной системой теплоснабжения с топками НТКС [Текст] / А.В. Крюков, **А.Е. Ткаченко** // Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых: Сборник научных трудов XVI научно-технической конференции аспирантов и студентов в г. Донецке, 25-26 мая 2016. – Донецк: ДонНТУ, 2016. – С. 135–138.

18. **Ткаченко, А.Е.** Повышение эффективности работы шахтного комплекса теплоснабжения при совместной работе котельных агрегатов НТКС на тепловую сеть // Вестник ДонНТУ: международный научно-технический журнал. – Донецк: ДонНТУ, 2016. – Вып.5. – С. 3–9.

19. **Ткаченко, А.Е.** Методика повышения эффективности работы группы котлоагрегатов низкотемпературного кипящего слоя [Текст] / А.Е. Ткаченко, Б.В. Гавриленко, С.В. Неежмаков // Энергетические системы: сборник трудов II Международной научно-технической конференции, 23-24 ноября 2017. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2017. – С. 100–106. (*Синтезирован алгоритм расчета рационального состава и производительности котлоагрегатов НТКС*).

20. **Ткаченко, А.Е.** К вопросу о повышении эффективности производства тепла в системе теплоснабжения шахты [Текст] / А.Е. Ткаченко // Современное строительство и архитектура. Энергосберегающие технологии. Сборник материалов VIII Республиканской научно-практической конференции, 24 ноября 2016 года – Бендеры, ГОУ ПГУ им. Т.Г. Шевченко, 2017. – С. 137-141.

21. **Ткаченко, А.Е.** Математическое моделирование совместной работы группы котлоагрегатов низкотемпературного кипящего слоя на тепловую сеть шахты [Текст] / А.Е. Ткаченко // XVIII Международная молодежная научная конференция «Севергеоэкотех-2017»: материалы конференции (12–14 апреля 2017 г.). В 5 ч. Ч. 3. – Ухта: УГТУ, 2018. – С. 118-122.

АННОТАЦИЯ

Ткаченко Анна Евгеньевна. Повышение энергоэкономической эффективности котлоагрегатов с низкотемпературным кипящим слоем систем теплоснабжения шахт. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. 05.23.03 – теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение. – Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». – Макеевка, 2018 г.

Диссертация посвящена изучению регулирования производительности группы котлоагрегатов с низкотемпературным кипящим слоем (НТКС) систем теплоснабжения шахт.

Во введении обоснована актуальность, сформулирована научная новизна, практическая ценность работы, дана ее общая характеристика.

В первом разделе выполнен обзор и проведен анализ технологических особенностей систем теплоснабжения шахт, котлоагрегатов с низкотемпературным кипящим слоем, а также способов и средств регулирования их производительности.

Во втором разделе разработана математическая модель распределения материальных и энергетических потоков в котлоагрегате с НТКС при производстве теплоты. На ее основании с помощью прикладного пакета моделирования выполнено исследование процесса производства теплоты котлоагрегатом с НТКС при различных управляющих воздействиях.

В третьем разделе изложены результаты проведенного натурального эксперимента в условиях шахты. Осуществлена структурная и параметрическая идентификация элементов котлоагрегата с НТКС на основании экспериментальных данных. Выполнена проверка адекватности предложенной математической модели.

В четвертом разделе разработан метод поиска рационального состава группы котельных агрегатов с НТКС, а также их производительности в зависимости от теплового спроса. Обоснован критерий эффективной работы группы котлоагрегатов с НТКС.

В пятом разделе разработаны алгоритм работы и структурная схема системы автоматического управления производством теплоты в системе теплоснабжения шахты. Выполнено технико-экономическое обоснование эффективности внедрения данной системы.

Ключевые слова: система теплоснабжения шахты, котлоагрегат, низкотемпературный кипящий слой, производительность, система автоматического управления, теплота, энергоэкономическая эффективность.

ABSTRACT

Тkachenko Anna. **Increase of energy-economic efficiency of boilers with low-temperature air-fluidized bed of heat supply systems of mines.** – Manuscript.

Thesis submitted for the scientific degree of Candidate of Technical Science in speciality 05.23.03 – Heat supply, ventilation, climatization, gas supply and lighting. – Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Makeevka, 2018 г.

The thesis is devoted to the study of the regulation of the group of boilers with low-temperature air-fluidized bed (LTAB) productivity in the mining heat supply systems.

In the introduction, relevance is grounded, scientific novelty is formulated, the practical value of the work is given, and its characteristic is given.

The first section reviews and analyzes the technological features of the mining heat supply systems, boilers with low-temperature air-fluidized bed, and also methods and means to regulate boilers' productivity.

In the second section, the mathematical model of the material and energy flows distribution in the boiler with LTAB during the heat production was developed. On its basis, using the applied modeling package, the process of the boiler with LTAB heat production under various control actions was researched.

The third section describes the results of the field experiment in the mine. The structural and parametric identification of the elements of boiler with LTAB was realized on the basis of experimental data. The proposed mathematical model adequacy was checked.

In the fourth section, the method to search for the rational composition of the group of boilers with LTAB, as well as each boiler's productivity, depending on heat demand, was developed. The criterion of the effective work of the group of boilers with LTAB was grounded.

In the fifth section, an algorithm of operation and a block diagram of the automatic control system of heat production in the mining heat supply system were developed. The feasibility study of the effectiveness of the implementation of this system was completed.

Key words: mining heat supply system, boiler, low-temperature air-fluidized bed, productivity, automatic control system, heat, energy-economic efficiency.