

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи  
УДК 621.165:697:34

**БОГДАНОВИЧ**  
**Максим Леонидович**

**СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ  
ЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ  
МАЛОЙ И СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальности 05.14.14 – Тепловые электрические станции,  
их энергетические системы и агрегаты

Минск, 2010

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете

- Научный руководитель **Седнин Алексей Владимирович**,  
кандидат технических наук, доцент, доцент,  
Белорусский национальный технический университет,  
кафедра «Тепловые электрические станции»
- Официальные оппоненты: **Несенчук Анатолий Петрович**,  
доктор технических наук, профессор, профессор,  
Белорусский национальный технический университет,  
кафедра «Промышленная теплоэнергетика и теплотехника»;
- Молочко Федор Иванович**,  
кандидат технических наук, старший научный сотрудник,  
главный специалист, Научно-исследовательское и  
проектное республиканское унитарное предприятие  
«БЕЛТЭИ», отдел общей энергетики
- Оппонирующая организация Проектное научно-исследовательское республиканское  
унитарное предприятие «БЕЛНИПИЭНЕРГОПРОМ»

Защита состоится 10 июня 2010 г. в 14-00 часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.01 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013 г. Минск, пр-т Независимости, 65, корп. 2, ауд. 201. Тел. (8-10-375-17) 293-91-45, факс (8-10-375-17) 292-91-37, e-mail: etr@bntu.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан «\_\_\_» мая 2010 г.

Ученый секретарь совета  
по защите диссертаций,  
доктор технических наук, профессор

В.А. Седнин

© Богданович М.Л., 2010

© БНТУ, 2010

## ВВЕДЕНИЕ

Энергетика является неотъемлемой частью реального сектора экономики любой страны и требует опережающих темпов развития по отношению к другим отраслям. В тоже время она является достаточно консервативной, что объясняется целым рядом факторов: сложностью создания и внедрения в энергетике передовых технологий, высокой капиталоемкостью энергетических объектов, длительными сроками их сооружения, важностью отрасли для создания условий надежного и эффективного функционирования промышленного и агропромышленных комплексов, социальной и жилищно-коммунальной сферы любого государства, существенным влиянием на окружающую среду. В современных условиях эксплуатация энергетических объектов осложняется резким повышением стоимости органического и ядерного топлива и обострением экологических проблем.

Поэтому, несомненно, актуальными являются вопросы структурной и параметрической оптимизации энергетической отрасли в целом и отдельных ее составляющих, к которым относятся системы теплоснабжения. Структура энергетики Республики Беларусь в настоящее время характеризуется преобладанием в ней теплофикационных мощностей на базе паротурбинных установок со средними и высокими параметрами пара, созданными в 50–70 гг. прошлого столетия. В середине девяностых годов остро встал вопрос, каким образом проводить модернизацию существующих энергетических объектов, решение, которого проводилось и проводится в настоящее время в рамках ряда Государственных программ развития энергетической отрасли страны.

В качестве приоритетных направлений развития теплоэнергетических объектов принято использование парогазовых технологий при модернизации тепловых электрических станций, строительство атомной электрической станции, развитие малой энергетики и объектов, использующих местные и альтернативные виды топлива. В этих условиях актуальным является решение вопросов, направленных на повышение эффективности работы существующих теплофикационных систем.

В республике имеется достаточно большое количество теплоэлектроцентралей со средними параметрами пара. Не смотря на незначительную их долю в балансе установленной электрической мощности энергосистемы (около 3 %), они относятся к градообразующим объектам, несут большую социальную нагрузку, так как являются основными теплоисточниками городских систем теплоснабжения. К аналогичным объектам следует отнести теплоэлектроцентрали ряда промышленных предприятий, в частности, сахарных заводов. Кроме того, следует отметить тот факт, что удельный расход топлива на выработку электрической энергии на этих станциях составляет 170–180 г у. т./кВт·ч при средней величине по энергосистеме 270–280 г у. т./кВт·ч.

Таким образом, актуальными являются вопросы определения оптимальных путей модернизации и дальнейшей эксплуатации этих станций в условиях развития атомной энергетики и увеличением в энергосистеме конденсационных мощностей на природном газе и твердом топливе, строительством на промышленных предприятиях и районных котельных объектов мини-ТЭЦ на базе газомоторного и газотурбинного оборудования. В диссертационной работе представлены результаты исследований, позволяющие в определенной степени решать вышеуказанные задачи и одновременно повысить эффективность эксплуатации систем теплоснабжения с теплоэлектроцентралями (ТЭЦ) средней и малой мощности.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Связь работы с крупными научными программами и темами**

Настоящая работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете (БНТУ) в соответствии с планом НИР кафедры «Тепловые электрические станции». Тема диссертационной работы утверждена Советом БНТУ (протокол № 198 от 23 января 2006 г.).

Цели и задачи исследования соответствуют современным тенденциям развития энергосистемы Республики Беларусь и энергоэффективной политике, проводимой в государстве, и определены основными направлениями энергетической политики Республики Беларусь на 2001–2005 гг. и на период до 2020 г. в области развития электроэнергетики и основными организационно-экономическими направлениями в области энергосбережения, Государственной комплексной программой модернизации основных производственных фондов Белорусской энергетической системы, энергосбережения и увеличения доли использования в республике собственных топливно-энергетических ресурсов в 2006–2010 гг., а также перечню приоритетных направлений фундаментальных и прикладных научных исследований (постановление Совета Министров Республики Беларусь от 17.05.2005 № 512) по разделу 1 «Энергообеспечение, нетрадиционные и возобновляемые источники энергии, энергосбережение и эффективное использование; создание энерго- и ресурсоэкономичных архитектурно-конструктивных систем нового поколения» в части прикладных научных исследований по пункту 1.2 «Энергетическая безопасность Республики Беларусь, разработка систем энергоснабжения и эффективного использования энергии, ядерная и водородная энергетика».

Исследования по теме диссертационной работы выполнялись в рамках важнейших комплексных научно-технических программ: Государственной комплексной программы научных исследований «Энергетическая безопасность» (задание «Разработать концепцию повышения надежности и эффективности управления системами централизованного теплоснабжения городов и населенных пунктов», № ГР 2006517, 2007–2010 гг.), программы НИР ГПО «Белэнерго» (задание «Анализ режимов теплоисточника с пониженными параметрами теплоносителя и его влияние на расход ТЭР», № ГР 2008163, 2007–2008 гг., задание «Разработка концепции создания АСУ ТП Минских тепловых сетей», № ГР 20083434, 2007–2008 гг., задание «Корректировка и подготовка новой редакции концепции развития теплоснабжения Республики Беларусь до 2020 года», № ГР 20083433, 2008 г.).

### **Цель и задачи исследования**

В настоящее время важнейшими проблемами народного хозяйства Республики Беларусь являются снижение энергоемкости валового национального продукта и повышение энергетической безопасности страны. Их решение в основном направлено на сокращение удельного потребления топливно-энергетических ресурсов в теплоэнергетике, в том числе в теплоснабжении.

Теплоэнергетика является одним из основных потребителей топливно-энергетических ресурсов. Несмотря на значительные успехи ученых в развитии новых технологий преобразования энергии и использования возобновляемых энергетических источников, совершенствование и развитие существующих технологий и снижение затрат при эксплуатации теплоэнергетического оборудования остаются важными задачами научных исследований.

**Объектом настоящего** исследования являются теплоэлектроцентрали малой и средней мощности и отопительные котельные в централизованных системах теплоснабжения.

**Предмет исследования** – структурные схемы и режимные параметры централизованных источников теплоснабжения малой и средней мощности и присоединенных к ним тепловых сетей.

**Целью исследований** является разработка технических и методических решений по повышению энергоэффективности и надежности функционирования систем централизованного теплоснабжения малой и средней мощности.

Для достижения указанной цели в диссертационной работе были поставлены задачи:

- выполнить технико-экономический анализ вариантов реконструкции существующих централизованных и децентрализованных паротурбинных ТЭЦ малой и средней мощности, с разработкой структурных решений по утилизации низкопотенциальной теплоты паровых турбин;
- провести численное исследование режимов функционирования системы теплоснабжения на базе паротурбинной ТЭЦ малой и средней мощности, разработать методику определения оптимальной температуры прямой сетевой воды;
- выполнить системный анализ вариантов реконструкции источников теплоснабжения малой мощности с использованием компрессионных теплонасосных установок и теплонасосных станции с газомоторными теплонасосными установками.

#### **Положения, выносимые на защиту**

Комплекс научно обоснованных методологических и технических решений, направленных на повышение энергоэффективности и надежности функционирования систем централизованного теплоснабжения малой и средней мощности, включающий:

- результаты технико-экономического анализа и обоснования целесообразности модернизации существующих в республике паротурбинных ТЭЦ средних параметров пара с применением комбинированных и совмещенных технологий, с использованием для оценки вариантов модернизации энергетических и экономических критериев эффективности и установлением условий привлекательности каждого из вариантов в зависимости от ограничений по мощности генерации электроэнергии;
- методику определения оптимальной температуры прямой сетевой воды для систем теплоснабжения с паротурбинными ТЭЦ средних параметров пара в условиях полной автоматизации теплопотребляющих установок и оборудования и преобладающей доли тепловой нагрузки коммунально-бытового сектора, с учетом динамики изменения тепловой нагрузки, уровня технологических потерь на транспорт тепловой энергии и температуры окружающей среды;
- аналитическое выражение для определения системной экономии топлива при модернизации отопительных котельных в теплонасосные станции с газомоторными теплонасосными установками в зависимости от КПД котлоагрегатов, абсолютного эффективного КПД двигателя, коэффициента преобразования энергии теплового насоса, коэффициента использования топлива и доли отпуска теплоты от пиковых водогрейных котлов, входящих в состав теплонасосных станций.

### **Личный вклад соискателя**

Теоретические и численные исследования, обобщенные в представленной работе, выполнены автором как самостоятельно, так и в соавторстве. При этом автору принадлежат: результаты технико-экономического анализа вариантов реконструкции ТЭЦ средних параметров пара входящих и не входящих в состав объединенной энергетической системы, результаты теоретического исследования использования компрессионных теплонасосных установок для нужд теплоснабжения на паротурбинных ТЭЦ, работающих в объединенной энергетической системе, разработка схем утилизации теплоты пара концевых уплотнений паровых турбин малой мощности, разработка методики определения оптимальной температуры прямой сетевой воды отпуска теплоты коммунально-бытовому потребителю от ТЭЦ средних параметров пара, аналитическое выражение для определения системной экономии топлива при переводе отопительных котельных в теплонасосные станции с газомоторными теплонасосными установками, написание основополагающих для исследования статей и материалов докладов конференций.

Совместными с соавторами являются: постановка задач исследования, разработка математических моделей, численные исследования, обработка результатов и их интерпретация; научно-производственные результаты, связанные с выполнением НИР; написание ряда статей, научных отчетов и материалов докладов конференций.

### **Апробация результатов диссертации**

Основные положения диссертационной работы докладывались на: IV–VII Международных научно-технических конференциях БНТУ «Наука – образованию, производству, экономике» (г. Минск, 2006–2009 гг.), Российской научно-технической конференции «Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике промышленности» (г. Ульяновск, 2006 г.), XVI, XVIII конференции стран СНГ с международным участием «Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики» (Ялта, 2006, 2008), Российской научно-технической конференции «Проблемы энерго- и ресурсосбережения» (г. Саратов, 2008 г.), XIV Белорусский энергетический и экологический конгресс «Energy expro» (г. Минск, 2009 г.).

### **Опубликованность результатов диссертации**

Основные положения диссертации опубликованы в 23 работах, в том числе в 8 статьях в научных журналах рекомендованных ВАК РБ, 7 статьях в тематических сборниках, трудах, материалах научных конференций и 8 научно-технических журналах. Общий объем опубликованных материалов в научных журналах – 3,2 авторского листа.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Логика построения работы определяется в постановке задач исследования и последовательном их решении для достижения цели, содержащейся в названии диссертационной работы.

Полный объем диссертации – 148 страницы. Всего иллюстраций – 65; таблиц – 19. Объем приложения – 19 страниц. Список использованных источников включает 104 наименования.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе представлен литературный обзор и анализ основных проблем эксплуатации источников теплоснабжения малой и средней мощности. Произведена постановка задач исследований.

Вторая глава посвящена анализу возможных вариантов реконструкции ТЭЦ средних начальных параметров пара (ТЭЦ СП) входящих и не входящих в состав объединенной энергосистемы (ОЭС) с применением различных типов генерирующего оборудования и структурной оптимизации ТЭЦ СП с паротурбинными установками. Рассматривались варианты модернизации электростанций по паротурбинной технологии (ПТУ ТЭЦ), газотурбинной (ГТУ ТЭЦ), парогазовой (ПГУ ТЭЦ) и применением газопоршневой надстройки паротурбинной части станции (ГПА ТЭЦ). В качестве критериев эффективности принимались как энергетический (экономия топлива в энергосистеме), так и экономические (дисконтированный доход при условии возврата капитала за расчетный период (ЧДД), внутренняя норма доходности (ВНД), динамический срок окупаемости, индекс доходности (ИД)). Полученные результаты технико-экономических расчетов различных вариантов реконструкции ТЭЦ СП показали, что оптимальное решение зависит от принятого критерия эффективности. По величине системной экономии топлива более предпочтительным является вариант парогазовой ТЭЦ (ПГУ ТЭЦ), по экономическим критериям – газопоршневая надстройка паротурбинной части станции (ГПА ТЭЦ) (таблица 1).

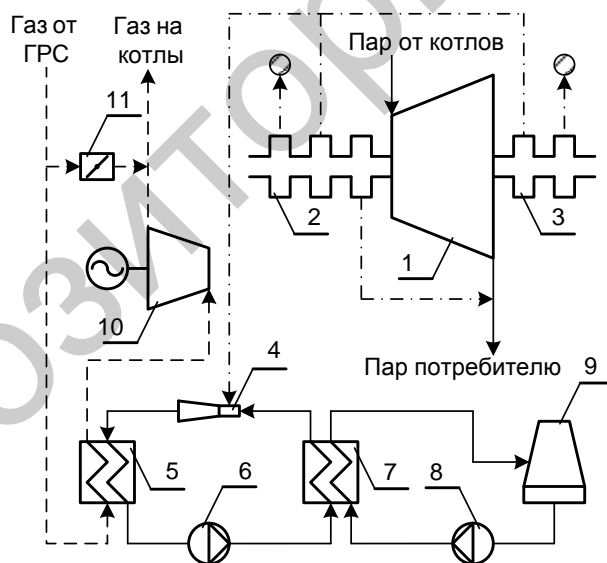
Таблица 1 – Основные технико-экономические показатели вариантов реконструкции ТЭЦ СП входящих в состав ОЭС при фиксированном расчетном периоде 16 лет

Рассматриваемый вариант	Экономия топлива, т у. т./год	ЧДД, тыс. у.е.	ВНД, %	T, лет	ИД
Вариант 1: ПТУ ТЭЦ	5 158,5	812,2	11,97	13,86	1,22
Вариант 2: ГТУ ТЭЦ	52 659,5	6 805,3	14,40	13,68	1,41
Вариант 3: ГПА ТЭЦ	24 495,0	<b>9 537,6</b>	<b>15,76</b>	<b>9,09</b>	<b>1,91</b>
Вариант 4: ПГУ ТЭЦ	<b>58 760,2</b>	7 717,9	14,11	13,72	1,39

Отмечено, что для электростанций, не входящих в состав ОЭС, анализ и выбор оптимального варианта реконструкции ТЭЦ, следует проводить с помощью экономических критериев, учитывая при этом как тарифы на покупаемую электроэнергию, так и возможные ограничения по объемам покупки избыточной электроэнергии энергосистемой. Наиболее привлекательным, при условии самобалансирования (мощность генерации электроэнергии выбирается по графикам электрических нагрузок предприятия), является вариант предусматривающий реконструкцию ТЭЦ с использованием ПТУ и ГПА. При условии выдачи избыточной выработанной электроэнергии в сеть, более предпочтительным является вариант реконструкции ТЭЦ с установкой ГТУ и парового котла-утилизатора. Однако, наименьшим финансовым рискам подвержен вариант с использованием ПТУ и ГПА, так как эффективность от его реализации практически не зависит от условий на рынке электроэнергии.

С целью повышения эффективности функционирования ТЭЦ СП было рассмотрено техническое решение по утилизации теплоты низкого потенциала с применением теплонасосных установок (ТНУ). Были исследованы схемы паротурбинных ТЭЦ СП с компрессионными ТНУ для электростанций, входящих в объединенную энергосистему. Получены результаты по определению возможной экономии топлива для ТЭЦ работающих как изолировано, так и совместно с водогрейной котельной. Показано, что в первом случае системная экономия топлива прямо пропорциональна коэффициенту преобразования энергии ТНУ и обратно пропорциональна удельной выработке электроэнергии на тепловом потреблении, во втором – пропорциональна коэффициенту преобразования энергии ТНУ независимо от удельной выработки электроэнергии на тепловом потреблении ТЭЦ. По мнению автора, внедрение ТНУ на ТЭЦ получит развитие с достижением электрического КПД отдельного производства электрической энергии до уровня 55–60 %, так как практическая реализация данного технического решения позволит сдерживать снижение эффективности теплофикации, а в отдельных случаях повышать ее.

Для улучшения энергетических показателей работы турбин с противодавлением был предложен ряд схем утилизации теплоты пара концевых уплотнений, применение которых приведет к системной экономии топлива. В частности предложена схема, которая может быть рекомендована для реализации на турбостроительных заводах, для комплектного производства паровой турбины и детандера для поставки на ТЭЦ работающей на природном газе (рисунок 1). При использовании данной схемы для условий Могилевской ТЭЦ-1 экономия топлива может составить от 170 до 250 т у. т./год.



1 – паровая турбина Р-6-3,4/0,5-1; 2 – передние концевые уплотнения; 3 – задние концевые уплотнения; 4 – подогреватель струйный; 5 – подогреватель природного газа; 6 – насос обратной воды; 7 – охладитель уплотнений; 8 – насос циркуляционный; 9 – вентиляционная градирня; 10 – детандер-генераторный агрегат; 11 – регулирующая заслонка

**Рисунок 1 – Схема утилизации теплоты пара концевых уплотнений турбины Р-6-3,4/0,5-1 с применением детандер-генераторного агрегата**



**Третья глава** посвящена разработке методики расчета оптимальной температуры прямой сетевой воды для паротурбинных ТЭЦ СП входящих в состав энергетической системы в условиях полной (100 %) автоматизации оборудования тепловых потребителей и определения параметров оптимальных температурных графиков регулирования отпуска тепловой энергии.

Паротурбинные ТЭЦ СП были разделены на две подгруппы: ТЭЦ СП с ПТУ двух противодавлений и ТЭЦ СП с ПТУ одного противодавления. В качестве критерия оптимальности при выборе эксплуатационного температурного графика в действующих системах теплоснабжения использовался минимум системного расхода топлива.

В роли прототипов для математических моделей систем теплоснабжения с ТЭЦ СП принимались виртуальные энергетические объекты с реальными энергетическими характеристиками оборудования. Так для математического описания потребителей теплоты выбирался один эквивалентный тепловой потребитель, подключенный к тепловой сети на наибольшем удалении от источника теплоснабжения. Эквивалентный потребитель представлял собой центральный тепловой пункт (ЦТП) с двумя видами тепловых нагрузок: горячего водоснабжения (ГВС) и отопления. В основу математической модели тепловых сетей была принята двухтрубная сеть протяженностью 12 км, проложенная воздушным способом с пенополиуретановой тепловой изоляцией. Диаметр трубопровода принимался неизменным по всей протяженности и равный 630 мм, толщина стенки трубопровода 8 мм. Для упрощения модели было принято допущение, что гидравлические характеристики трубопроводной системы эквивалентны характеристикам сети Западной мини-ТЭЦ, входящей в состав филиала Пинские тепловые сети РУП «Брестэнерго», а так же что система работает без транспортного запаздывания.

На основании результатов математического моделирования была разработана методика определения оптимальной температуры прямой сетевой воды отпуска теплоты коммунально-бытовому потребителю от ТЭЦ СП при условии полной автоматизации теплопотребляющих установок. Предлагаемая методика учитывает изменение величины технологических потерь в тепловых сетях, значений температур наружного воздуха, а также позволяет оценивать влияние ряда внешних факторов (фактического состояния тепловой изоляции трубопроводов сетевой воды, эффективности производства электроэнергии на замыкающей конденсационной электростанции (КЭС), доли тепловой нагрузки ГВС от общей расчетной тепловой нагрузки, мощности корректирующего насоса на ЦТП), которые не зависят от режима эксплуатации источника теплоты.

Обработка результатов численного исследования позволила получить регрессионные уравнения (1) и (2) для определения оптимальной температуры прямой сетевой воды для каждой подгруппы исследуемых электростанций в зависимости от величины технологических тепловых потерь в тепловых сетях и различных значений температур наружного воздуха (рисунок 2).

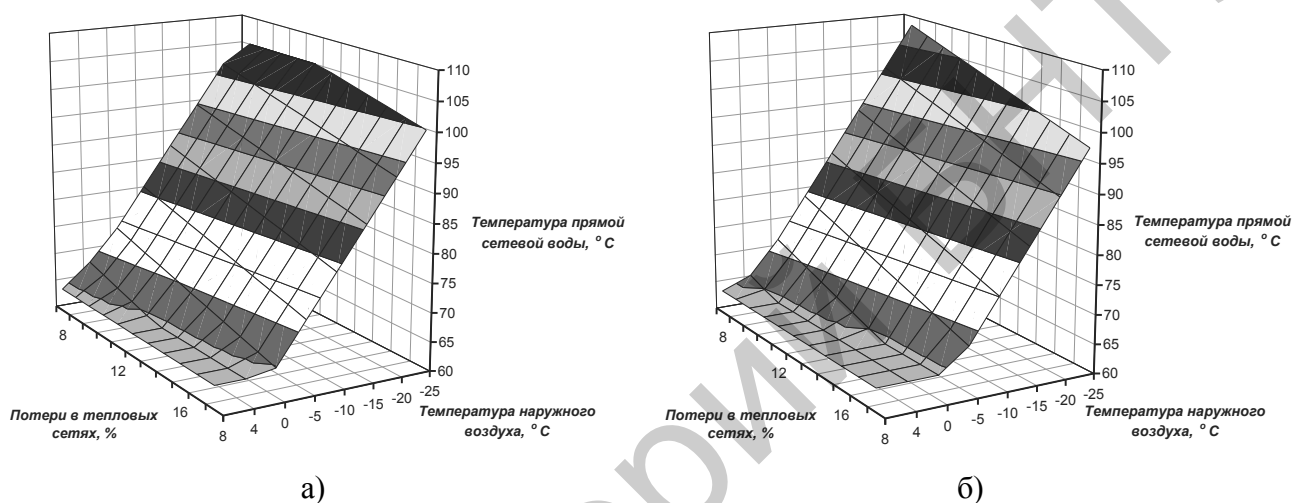
Для ТЭЦ СП с ПТУ двух противодавлений

$$\begin{cases} t_{\text{пс}}^{\text{opt}} = -0,90\bar{Q}_{\text{пот}} - 1,40t_{\text{нв}} + 81; \\ t_{\text{пс}}^{\text{max}} \geq t_{\text{пс}}^{\text{opt}} \geq t_{\text{пс}}^{\text{lim}}. \end{cases} \quad (1)$$

Для ТЭЦ СП с ПТУ одного противодействия

$$\begin{cases} t_{\text{пс}}^{\text{opt}} = -1,14 \bar{Q}_{\text{пот}} - 1,46 t_{\text{нв}} + 81; \\ t_{\text{пс}}^{\text{max}} \geq t_{\text{пс}}^{\text{opt}} \geq t_{\text{пс}}^{\text{lim}}. \end{cases} \quad (2)$$

В выражениях (1) и (2):  $\bar{Q}_{\text{пот}}$  – технологические потери тепловой энергии в сети, выраженные в долях (относительных единицах);  $t_{\text{нв}}$  – температура наружного воздуха, °С;  $t_{\text{пс}}^{\text{max}}$ ,  $t_{\text{пс}}^{\text{lim}}$  – максимально и минимально допустимые температуры прямой сетевой воды, °С.

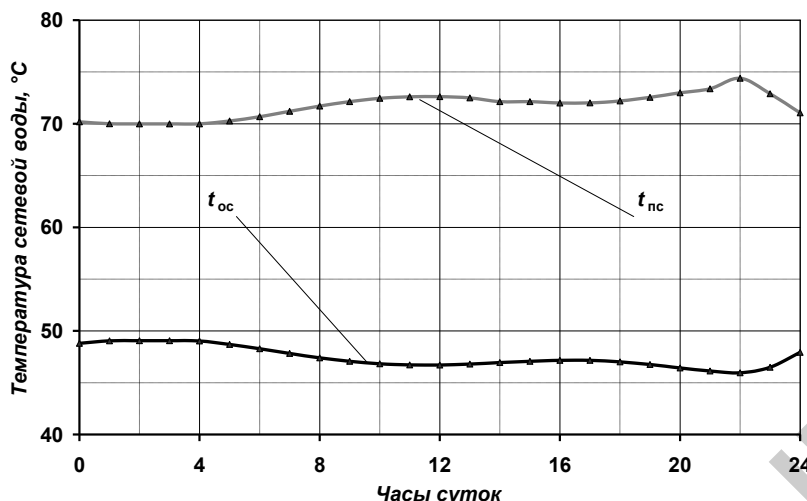


а – для ТЭЦ СП с ПТУ двух противодействий;  
б – для ТЭЦ СП с ПТУ одного противодействия

**Рисунок 2 – Трехмерная зависимость оптимальной температуры прямой сетевой воды от величины технологических тепловых потерь в тепловых сетях, при различных температурах наружного воздуха**

С использованием разработанной методики были проведены расчеты по определению влияния параметров теплоносителя на работу ТЭЦ СП. Доказано, что оптимальные температурные графики теплоснабжения должны рассчитываться индивидуально для каждой теплофикационной системы, даже в случаях с тепловыми источниками одного типа и с учетом факторов, не зависящих от производителя тепловой энергии. Для полностью автоматизированных систем теплоснабжения отпуск теплоты может осуществляться с любой температурой теплоносителя в пределах технической возможности работы оборудования и условий обеспечения качественного теплоснабжения. При этом существует оптимальный температурный режим в течение суток, при котором системный расход топлива минимальный. Этому режиму соответствует работа ТЭЦ по динамическому температурному графику (рисунок 3). При работе ТЭЦ СП по динамическому температурному графику может быть достигнута экономия топлива от 0,5 до 1,5 %.

**Четвертая глава** посвящена рассмотрению возможности реконструкции источников теплоснабжения малой и средней мощности в условиях ограниченного отпуска электроэнергии в энергосистему.



**Рисунок 3 – Зависимость изменения температуры прямой и обратной сетевой воды в течение суток при работе теплофикационной системы по динамическому температурному графику**

Как ранее отмечалось, в Республике Беларусь планируется строительство атомной электростанции (АЭС). Предполагается, что она будет состоять из 2 энергоблоков суммарной установленной мощностью 2000–2400 МВт. Предполагается, что производимая ей электроэнергия будет потребляться внутри страны. Ввод АЭС непосредственно скажется на изменении базовой части графика электрических нагрузок и ограничит ввод электрических мощностей за счет развития паротурбинных и парогазовых технологий на действующих ТЭС.

В этих условиях одним из возможных направлений развития современных систем теплоснабжения может служить перевод отопительных котельных в теплонаносные станции с газомоторными ТНУ. При этом может быть достигнуты две основные цели: снижение расхода топлива непосредственно на источнике и стабилизация структуры генерирующих мощностей энергосистемы.

Для определения системной экономии топлива при переводе отопительных котельных в теплонаносные станции (ТНС) с газомоторными ТНУ было получено аналитическое выражение для удельной экономии топлива  $\Delta b_c$  на единицу отпущенной тепловой энергии, учитывающее как характеристики привода ТНУ, так и пиковых водогрейных котлов:

$$\Delta b_c = 34,2 \left( \frac{1}{\eta_{ка}} - \frac{1}{\eta_d (k-1 + \varphi)} \right) (1 - \rho), \text{ кг у. т./ГДж}, \quad (3)$$

где 34,2 – коэффициент перевода 1 ГДж в эквивалент условного топлива, кг у. т./ГДж;  $\eta_{ка}$  – КПД котла (парового или водогрейного), доли;  $\eta_d$  – абсолютный эффективный КПД газотурбинного двигателя (ГТД) или газопоршневого двигателя (ГПД), доли;  $k$  – коэффициент преобразования энергии ТНУ, МВт/МВт;  $\varphi$  – коэффициент использования теплоты топлива ГТД или ГПД, доли;  $\rho$  – доля теплоты отпущенной от водогрейных котлов ТНС, доли.

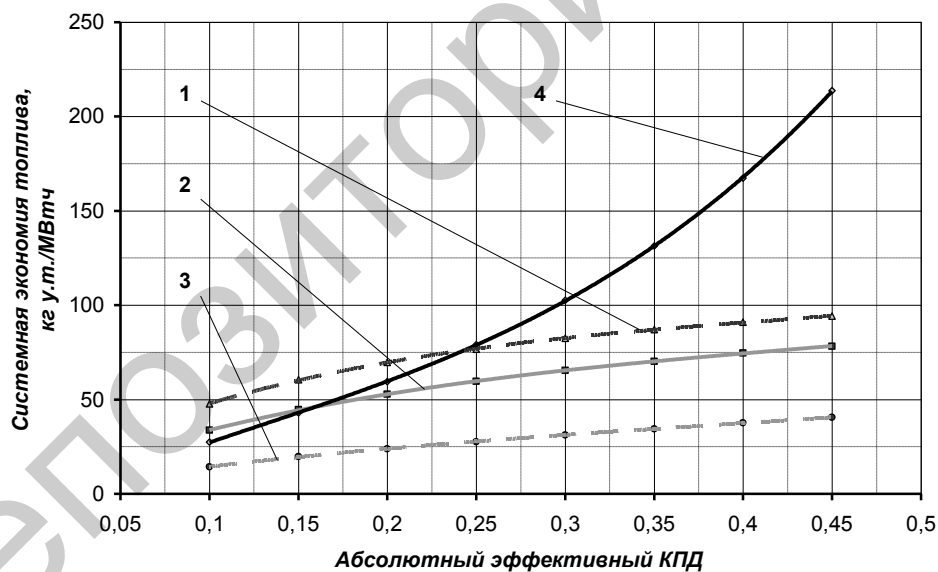
Для определения условий, при которых будет оправдан перевод существующих котельных в ТНС, была составлена математическая модель для трех вариантов систем

теплоснабжения с одинаковыми потребителями и тепловыми сетями, но с различными теплоисточниками. Расчеты по данной модели позволили выполнить анализ эффективности работы систем теплоснабжения ТНС с различным газомоторным приводом ТНУ по сравнению с котельной (базовый вариант), при различной стоимости топлива (таблица 2).

Таблица 2 – Основные технико-экономические показатели работы системы теплоснабжения при реконструкции котельной в ТНС (расчетный период  $\tau = 16$  лет)

Вариант реконструкции	Показатель								
	Затраты, млн дол. США	Выбросы $\text{NO}_x$ , т/год	Экономия топлива, т у. т./год	Простой срок окупаемости, лет	Динамический срок окупаемости, лет	ЧДД, тыс. дол. США	ВНД, %	ИД	Предельные затраты, млн дол. США
Базовый	—	11,86	—	—	—	—	—	—	—
Вариант 1 ГТД	5,6	9,12	2 420	5,8	15,3	154	10,39	1,09	5,8
Вариант 2 ГПД	6,9	18,88	3 710	4,7	11,2	1 925	13,58	1,36	9,4

Так же были проведены численные исследования о целесообразности перевода ТЭЦ малой мощности, для которых необходима замена отработавшего свой ресурс оборудования, в теплонасосные станции с газомоторными ТНУ (рисунок 4).



1 – для ТНС,  $k = 6$ ; 2 – для ТНС,  $k = 4$ ; 3 – для ТНС,  $k = 2$ ; 4 – для ТЭЦ

**Рисунок 4 – Системная экономия топлива в зависимости от абсолютного эффективного КПД для различных вариантов реконструкции ТЭЦ с отработавшим свой ресурс оборудованием**

Результаты расчетов показали, что вариант перевода ТЭЦ СП в ТНС с газомоторными ТНУ уступает по экономической привлекательности прочим вариантам реконструкции, рассмотренным во второй главе (таблица 3). Однако получаемая при

подобной реконструкции системная экономия топлива достигается без изменения структуры генерирующих мощностей ОЭС.

Таблица 3 – Основные технико-экономические показатели ТЭЦ СП в ТНС с газомоторными ТНУ (расчетный период  $\tau = 16$  лет)

Запросы, млн дол. США	Экономия топлива, т у./год	Простой срок окупаемости, лет	Динамический срок окупаемости, лет	ЧДД, тыс. дол. США	ВНД, %	ИД	Предельные затраты, млн дол. США
10,9	7 200	5,70	15,31	255	10,36	1,11	11,2

В этой же главе исследованы условия эффективности использования теплофикационных систем промышленного предприятия на базе ГТУ для покрытия пиковых электрических нагрузок в энергосистеме. Были проведены расчеты при различных соотношениях стоимости топлива и тарифов на покупку электроэнергии энергосистемой. Результаты численного исследования показали, что для вновь вводимых энергетических комплексов промышленных предприятий на базе мини-ТЭЦ с ГТУ допустимо и экономически целесообразно завышение установленной электрической мощности по сравнению с требуемой для электроснабжения самого предприятия. Несмотря на увеличение капитальных затрат при строительстве объекта, возможность использования этих мощностей для покрытия пиковых электрических нагрузок в определенных условиях, например при использовании дифференцированных тарифов на покупку электроэнергии является оправданным и выгодным мероприятием как для самого предприятия, так и для ОЭС.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе на основе обобщения результатов выполненных исследований разработаны технические и методические решения по повышению эффективности и надежности функционирования существующих систем теплоснабжения на базе ТЭЦ малой и средней мощности, которые занимают особое место в электроэнергетике республики и требуют пристального внимания в настоящее время, в виду значительного роста цен на органическое топлива и перспективы строительства Белорусской атомной электростанции.

### Основные научные результаты диссертации

1. В результате выполненного теоретического и численного исследования доказана перспективность проведения модернизации существующих ТЭЦ СП с применением комбинированных технологий производства электроэнергии [1, 2, 9, 18, 21]. Полученные результаты технико-экономического анализа вариантов реконструкции ТЭЦ СП показали, что выбор оптимального решения зависит от принятого критерия эффективности.

Определено, что для объектов, входящих в состав ОЭС, по энергетическому критерию (системной экономии топлива) предпочтителен вариант ПГУ ТЭЦ, по экономическим критериям – газопоршневая надстройка паротурбинной части станции [10, 19, 20]. Для электростанций, не входящих в состав ОЭС оптимальный вариант определяется условиями продажи избыточной выработанной электроэнергии в энергоси-

стему [3, 14, 22]. Экономическая эффективность различных вариантов реконструкции промышленных ТЭЦ определяется также условиями на рынке электроэнергии. Наиболее привлекательным при условии самобалансирования (мощность генерации электроэнергии выбирается по графикам электрических нагрузок предприятия) является вариант, предусматривающий реконструкцию ТЭЦ с использованием ПТУ и ГПА. В условиях, когда неограничен отпуск электроэнергии в энергосистему, предпочтителен вариант реконструкции ТЭЦ с установкой ГТУ и котла-утилизатора низкого давления. Наименьшим финансовым рискам подвержен вариант с использованием ПТУ и ГПА, так как эффективность от его реализации практически не зависит от условий на рынке электроэнергии [3, 22].

Обоснована целесообразность при проектировании и модернизации теплоэнергетических систем промышленных предприятий рассматривать варианты выбора мощности электрогенерирующего оборудования с учетом возможности их использования для покрытия пиковых нагрузок энергосистемы без увеличения расхода топлива [4].

2. Выявлены условия эффективности применения компрессионных ТНУ для использования низкопотенциальной теплоты на паротурбинных ТЭЦ малой и средней мощности. Доказано, что при работе ТЭЦ изолированно от водогрейной котельной системная экономия топлива прямо пропорциональна коэффициенту преобразования энергии ТНУ и обратно пропорциональна удельной выработке электроэнергии на тепловом потреблении ТЭЦ, а при работе ТЭЦ параллельно с водогрейной котельной системная экономия топлива прямо пропорциональна коэффициенту преобразования энергии ТНУ независимо от удельной выработки электроэнергии на тепловом потреблении ТЭЦ [11, 12]. Эффективность применения ТНУ на ТЭЦ определяется энергетическим КПД раздельного производства электрической энергии, при повышении последнего применение ТНУ позволяет сдерживать снижение эффективности теплофикации [12].

3. Показано, что в существующих схемах ПТУ ТЭЦ имеются внутренние резервы для повышения их эффективности за счет использования потерь, связанных с конструктивными недостатками энергогенерирующего оборудования [3, 13, 15]. Так наличие потерь энергии с протечками пара в турбинах уменьшает возможную выработку электроэнергии и отпуск теплоты от ТЭЦ. Предложены схемы использования теплоты пара концевых уплотнений с включением в тепловую схему ДГА и ТНУ, применение которых приведет к системной экономии топлива. На примере турбины Р-6-3,4/0,5-11 показано, что реализация предложенных технических решений по использованию теплоты пара концевых уплотнений позволяет сэкономить 170–240 т у. т. в год [6, 15].

4. Рассмотрены общие подходы выбора оптимального температурного графика и составлены математические модели виртуальных систем теплоснабжения коммунально-бытовых потребителей от ТЭЦ со средними начальными параметрами пара с паротурбинными установками двух и одного противодавлений [8, 23]. Разработаны алгоритм и методика определения оптимальной температуры прямой сетевой воды отпуска теплоты коммунально-бытовому потребителю от ТЭЦ СП при условий полной автоматизации теплоснабжающих установок, учитывающей технологические потери в тепловых сетях и температуру наружного воздуха [8].

В результате анализа результатов численного эксперимента доказано, что оптимальные температурные графики центрального регулирования отпуска тепловой

энергии должны рассчитываться индивидуально для каждой теплофикационной системы даже для случаев с тепловыми источниками одного типа с учетом ряда факторов (фактического состояния тепловой изоляции трубопроводов сетевой воды, эффективности производства электроэнергии на замыкающей конденсационной электростанции, доли тепловой нагрузки ГВС от общей расчетной тепловой нагрузки, мощности корректирующего насоса на ЦТП), которые не зависят от режима эксплуатации источника тепловой энергии [5, 8, 17, 23].

Доказано, что существует оптимальный температурный режим отпуска тепловой энергии в течение суток, при котором системный расход топлива минимальный. Этому режиму соответствует работа ТЭЦ по динамическому температурному графику. Экономия топлива при работе ТЭЦ СП по динамическому температурному графику может достигать 0,5–1,5 %.

Применение оптимального температурного графика отпуска тепловой энергии следует расценивать как абсолютно эффективное техническое решение, так как оно практически не требует привлечения финансовых затрат и достигается изменением режима работы оборудования ТЭЦ. Полученные результаты подтверждают необходимость корректировки температуры прямой сетевой воды в зависимости от тепловой нагрузки, времени суток, температуры наружного воздуха и величины технологических потерь, т. е. создания динамических температурных графиков [5, 8, 23].

5. В условиях роста цен на углеводородное топливо, прежде всего на природный газ, а также учитывая, что вопросы охраны окружающей среды приобретают все большую актуальность, одним из возможных направлений развития современных систем теплоснабжения может служить перевод ТЭЦ малой и средней мощности и отопительных котельных в теплонаносные станции с газомоторными ТНУ [7, 16].

Получено аналитическое выражение определения системной экономии топлива при переводе отопительных котельных в теплонаносные станции с газомоторными ТНУ. Системная экономия топлива, а также доля и мощность водогрейных котлов при работе ТНС с ГПД выше, чем с ГТД, и объясняется большей величиной абсолютного эффективного КПД двигателя. Экономическая эффективность мероприятия наиболее существенно зависит от стоимости используемого топлива и при прочих равных условиях ниже у ТНС с ГПД, чем с ГТД. Величина выбросов оксидов азота при работе ТНС с ГПД выше, чем с ГТД, что объясняется более высокой температурой сгорания топлива и большим числом часов работы в году водогрейных котлов [7].

6. Показано, что при определенных условиях и учете всех сопутствующих факторов, в частности степень выработки моторесурса оборудования, стоимости топлива, структуры электрогенерирующих мощностей энергосистемы, перевод ТЭЦ СП в ТНС с газомоторными ТНУ с газомоторным приводом по энергетическому критерию может быть выгодным [16].

Вариант перевода ТЭЦ в ТНС уступает по экономической привлекательности другим вариантам модернизации. Так по динамическому сроку окупаемости он уступает варианту реконструкции по паротурбинному циклу на 9,47 %, по газотурбинному – на 10,65, по парогазовому – на 10,39, по газопоршневому – на 17,44 %. Однако основное преимущество от проведения такой реконструкции заключается в достижении системной экономии топлива без изменения структуры генерирующих мощностей белорусской энергетической системы. После ввода АЭС можно прогнозировать снижение ночной стоимости электроэнергии, для стимулирования потребителей смещать производственные нагрузки в течение суток. В таких условиях становиться эко-

номически выгодным применение даже ТНС с ТНУ с электроприводом, работающих совместно с аккумуляторами теплоты. Привлекательность данного варианта реконструкции ТЭЦ малой и средней мощности возрастает с ростом стоимости топлива [16].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

1. Практическая и экономическая значимость результатов, полученных в диссертационной работе, заключается в возможности их использования для научного обоснования технических решений при модернизации ТЭС СП, создании новых систем теплоснабжения и оптимизации режимов их работы в зависимости от конкретных условий, диктуемых внешними системами, для достижения экономии топлива и снижение выбросов в атмосферу.

2. Предложенные подходы к реконструкции паротурбинных ТЭЦ малой мощности, а также разработанные структурные решения по использованию низкопотенциальной теплоты могут применяться при выборе оптимального варианта реконструкции для действующих энергетических объектов. В частности, полученные в диссертационной работе результаты, использовались при выборе варианта реконструкции ТЭЦ Городейского сахарного завода.

3. Разработанная схема с использованием низкопотенциальной теплоты для подогрева газа перед детандером может быть рекомендована для реализации на турбостроительных заводах, для комплектного производства паровой турбины и детандера для поставки на ТЭЦ работающей на природном газе.

4. Разработанную методику определения оптимальной температуры прямой сетевой воды целесообразно использовать при переходе на динамические температурные графики центрального регулирования отпуском тепловой энергии, что определено Концепцией развития теплоснабжения Республики Беларусь на период до 2020 г.

Полученные в диссертационной работе результаты по определению оптимальной температуры прямой сетевой воды были использованы при оптимизации режимов работы Пинской ТЭЦ.

5. При разработке схем теплоснабжения городов Республики Беларусь целесообразно рассматривать вариант строительства ТНС с газомоторным приводом, позволяющим сохранить структуру генерирующих мощностей энергосистемы, что особенно актуально в связи с разуплотнением графика электрических нагрузок и планируемого строительства АЭС.

Возможность использования ТНУ с ГПД (ГТД) также необходимо рассматривать как один из вариантов реконструкции действующих источников централизованного теплоснабжения.



## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в научных рецензируемых журналах

1. Седнин, А.В. Пути реконструкции теплофикационных источников малой и средней мощности Республики Беларусь / А.В. Седнин, М.Л. Богданович // Энергетика (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2007. – № 5. – С. 77–85.
2. Sednin, A.V. Power system development in Belarus. Problems and issues / A.V. Sednin, M.L. Bogdanovich // Cogeneration and on-site power production. – 2008. – № 1. – P. 49–55.
3. Седнин, В.А. Анализ эффективности вариантов реконструкции ТЭЦ сахарных заводов / В.А. Седнин, А.В. Седнин, М.Л. Богданович, А.А. Шимукович, И.Н. Прокопья // Энергия и менеджмент. – 2008. – № 4. – С. 40–45.
4. Седнин, В.А. Возможность использования энергетических комплексов промышленных предприятий для покрытия пиковых электрических нагрузок / В.А. Седнин, А.В. Седнин, М.Л. Богданович // Энергия и менеджмент. – 2009. – № 1. – С. 6–10.
5. Богданович, М.Л. Влияние температуры сетевой воды на эффективность систем теплоснабжения с паротурбинными ТЭЦ малой мощности нагрузок / М.Л. Богданович, В.А. Седнин, А.В. Седнин // Энергия и менеджмент. – 2009. – № 3. – С. 20–24.
6. Богданович, М.Л. Утилизация теплоты пара концевых уплотнений турбин с противодавлением малой мощности / М.Л. Богданович // Энергетика и ТЭК. – 2009. – № 7/8. – С. 24–27.
7. Богданович, М.Л. Перевод отопительных котельных в теплонаносные станции с газомоторными ТНУ / М.Л. Богданович // Энергия и менеджмент. – 2009. – № 4. – С. 18–22.
8. Седнин, В.А. Оптимизация параметров температурного графика отпуска теплоты в теплофикационных системах / В.А. Седнин, А.В. Седнин, М.Л. Богданович // Энергетика (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2009. – № 4. – С. 55–62.

### Статьи в научно-практических журналах

9. Седнин, А.В. Влияние АЭС на перспективное развитие Белорусской энергетической системы / А.В. Седнин, М.Л. Богданович // Энергия и менеджмент. – 2007. – № 4. – С. 5–8.
10. Седнин, А.В. Анализ технических решений реконструкции ТЭЦ со средними параметрами свежего пара / А.В. Седнин, М.Л. Богданович // Энергия и менеджмент. – 2007. – № 6. – С. 24–28.
11. Богданович, М.Л. Использование компрессионных теплонаносных установок на республиканских паротурбинных ТЭЦ / М. Богданович, В.А. Сенько, В.П. Тумашевский // Энергетика и ТЭК. – 2009. – № 2. – С. 16–17.
12. Богданович, М.Л. Использование компрессионных теплонаносных установок для нужд теплоснабжения на паротурбинных ТЭЦ, работающих в объединенной энергетической системе / М.Л. Богданович // Новости теплоснабжения. – 2009. – № 3. – С. 25–29.

13. Богданович, М.Л. Подогрев природного газа перед ДГА низкопотенциальными потоками теплофикационных паровых турбин / М.Л. Богданович, А.Ю. Слижевский, В.П. Тумашевский, В.А. Сенько // Энергетика и ТЭК. – 2009. – № 4. – С. 38–39.
14. Седнин, В.А. Эффективность реконструкции ТЭЦ сахарных заводов / В.А. Седнин, А.В. Седнин, М.Л. Богданович, Шкловчик Д.И., А.А. Шимукович, И.Н. Прокопья // Сахар. – 2009. – № 5. – С. 62–66.
15. Богданович, М.Л. Теоретическое исследование утилизации теплоты пара концевых уплотнений турбин с противодавлением малой мощности / М.Л. Богданович // Новости теплоснабжения. – 2009. – № 8. – С. 33–39.
16. Седнин, В.А. Перевод источников теплоты систем централизованного теплоснабжения в теплонасосные станции с газомоторными ТНУ / В.А. Седнин, А.В. Седнин, М.Л. Богданович, Шкловчик Д.И., А.А. Шимукович, И.Н. Прокопья // Энергетическая стратегия. – 2010. – № 1. – С. 55–58.

### **Материалы конференций**

17. Седнин, А.В. К созданию автоматизированной системы управления водогрейной котельной / А.В. Седнин, П.Ю. Марченко, М.Л. Богданович // Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике промышленности: материалы пятой рос. науч.-техн. конф., 20–21 апреля 2006 г. / Ул. гос. техн. ун-т; редкол.: В.И. Шарпов [и др.]. – Ульяновск, 2006. – Т. 2. – С. 276–284.
18. Седнин, А.В. Пути реконструкции ТЭЦ малой мощности Республики Беларусь / А.В. Седнин, М.Л. Богданович // Наука – образованию, производству, экономике: материалы четвертой междунар. науч.-техн. конф., 22 мая 2006 г. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол.: Б.М. Хрусталева [и др.]. – Минск, 2006. – Т. 1. – С. 65–66.
19. Седнин, В.А. К техническому перевооружению источников малой мощности Республики Беларусь / В.А. Седнин, А.В. Седнин, М.Л. Богданович, А.А. Шимукович // Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики: материалы XVI конф. стран СНГ, 20–21 апреля 2006 г. / ИПЦ АЛКОН НАН Украины : А.И. Сигал. – Киев, 2006. – Т.2 – С. 20–31.
20. Седнин, А.В. К выбору варианта реконструкции ТЭЦ малой мощности / А.В. Седнин, М.Л. Богданович // Наука – образованию, производству, экономике: материалы пятой междунар. науч.-техн. конф., 21 мая 2007 г. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол.: Б.М. Хрусталева [и др.]. – Минск, 2007. – Т. 1. – С. 70–74.
21. Седнин, А.В. Развитие ТЭЦ средних параметров пара в небольших и изолированных энергетических системах в условиях ограничения выработки электроэнергии / А.В. Седнин, М.Л. Богданович // Наука – образованию, производству, экономике: материалы шестой междунар. науч.-техн. конф., 20 мая 2008 г. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол.: Б.М. Хрусталева [и др.]. – Минск, 2008. – Т. 1. – С. 75–76.
22. Седнин, В.А. Варианты реконструкции теплоэнергетического комплекса сахарных заводов / В.А. Седнин, А.В. Седнин, М.Л. Богданович // Проблемы энерго- и ресурсосбережения: сборник научных трудов / Сар. гос. техн. ун-т; редкол.: Б.А. Семенов [и др.]. – Саратов, 2009. – Т. 2. – С. 130–136.
23. Седнин, А.В. Применение динамических температурных графиков на паротурбинных ТЭЦ / А.В. Седнин, М.Л. Богданович // Наука – образованию, производству, экономике: материалы седьмой междунар. науч.-техн. конф., 22 мая 2009 г. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол.: Б.М. Хрусталева [и др.]. – Минск, 2009. – Т. 1. – С. 69–70.

## РЭЗЮМЕ

Багдановіч Максім Лявонавіч

### Структурна-параметрычная аптымізацыя цэнтралізаваных крыніц цеплазабеспячэння малой і сярэдняй магутнасці

**Ключавыя словы:** структурна-параметрычная аптымізацыя, цеплавая электрычная станцыя, сістэма цэнтралізаванага цеплазабеспячэння, рэжым работы цеплагенерыруючых устаноў і цеплавых сетак, кацельня, тэмпературны графік, цепланасосныя станцыі.

**Мэта работы:** распрацоўка тэхнічных і метадычных рашэнняў па павышэнні энэргаэфектыўнасці і надзейнасці функцыянавання сістэм цэнтралізаванага цеплазабеспячэння малой і сярэдняй магутнасці.

**Метад даследавання:** матэматычнае мадэляванне і колькасны эксперымент.

#### Атрыманыя вынікі і навізна

Праведзена тэхніка-эканамічнае абгрунтаванне мэтазгоднасці мадэрнізацыі існуючых паратурбінных ЦЭЦ СП з прымяненнем камбінаваных і сумесных тэхналогій, з выкарыстаннем для ацэнкі варыянтаў мадэрнізацыі энергетычных і эканамічных крытэрыяў эфектыўнасці і ўстанаўленнем умоў прывабнасці кожнага з варыянтаў ад абмежаванай па магутнасці генерацыі электраэнергіі.

Распрацавана метадыка вызначэння аптымальнай тэмпературы прамой сецявой вады для сістэм цеплазабеспячэння з паратурбіннымі ЦЭЦ СП ва ўмовах поўнай аўтаматызацыі цеплаўжываючых устаноў і абсталявання, пераважнай доляй нагрузцы камунальна-бытавога сектара ў залежнасці ад дынамкі змянення цеплавой нарузкі, узроўня тэхналагічных страт на транспарт цеплавой энэргіі і тэмпературы акружаючага асяроддзя.

Прапанаваны аналітычны выраз для вызначэння сістэмнай эканоміі паліва пры мадэрнізацыі ацяпляльных кацельных у цепланасосныя станцыі з газаматорнымі цепланасоснымі ўстаноўкамі ў залежнасці ад ККД катлаагрэгатаў, абсалютнага эфектыўнага ККД рухавіка, каэфіцыента пераўтварэння энэргіі цеплавога насоса, каэфіцыента ўжывання паліва рухавіка і долі водпуску цеплаты ад пікавых вадагрэйных катлоў ЦНС.

**Ступень выкарыстання:** вынікі работы былі выкарыстаны пры выбары варыянта рэканструкцыі ЦЭЦ Гарадзейскага цукровага завода, пры аптымізацыі работы Пінскай ЦЭЦ і пры распрацоўцы канцэпцыі развіцця цеплазабеспячэння Рэспублікі Беларусь да 2020 года.

**Галіна прымянення:** аптымізацыя рашэнняў па мадэрнізацыі цеплавых крыніц сістэм цэнтралізаванага цеплазабеспячэння і рэжымаў іх эксплуатацыі.

## РЕЗЮМЕ

Богданович Максим Леонидович

### **Структурно-параметрическая оптимизация централизованных источников теплоснабжения малой и средней мощности**

**Ключевые слова:** структурно-параметрическая оптимизация, тепловая электрическая станция, система централизованного теплоснабжения, режимы работы теплогенерирующих установок и тепловых сетей, котельная, температурный график, теплонасосные станции.

**Цель работы:** разработка технических и методических решений по повышению энергоэффективности и надежности функционирования систем централизованного теплоснабжения малой и средней мощности.

**Метод исследования:** математическое моделирование и численный эксперимент.

#### **Полученные результаты и новизна**

Проведен технико-экономический анализ и обоснования целесообразности модернизации существующих в республике паротурбинных ТЭЦ средних параметров пара с применением комбинированных и совмещенных технологий, с использованием для оценки вариантов модернизации энергетических и экономических критериев эффективности и установлением условий привлекательности каждого из вариантов в зависимости от ограничений по мощности генерации электроэнергии.

Разработана методика определения оптимальной температуры прямой сетевой воды для систем теплоснабжения с паротурбинными ТЭЦ СП в условиях полной автоматизации теплопотребляющих установок и оборудования, преобладающей доли нагрузки коммунально-бытового сектора, с учетом динамики изменения тепловой нагрузки, уровня технологических потерь на транспорт тепловой энергии и температуры окружающей среды.

Предложено аналитическое выражение для определения системной экономии топлива при модернизации отопительных котельных в теплонасосные станции с газомоторными теплонасосными установками в зависимости от КПД котлоагрегатов, абсолютного эффективного КПД двигателя, коэффициента преобразования энергии теплового насоса, коэффициента использования топлива и доли отпуска теплоты от пиковых водогрейных котлов, входящих в состав теплонасосных станций.

**Степень использования:** результаты работы были использованы при выборе варианта реконструкции ТЭЦ Городейского сахарного завода, при оптимизации работы Пинской ТЭЦ и при разработке концепции развития теплоснабжения Республики Беларусь до 2020 года.

**Область применения:** оптимизация решений по модернизации теплоисточников систем централизованного теплоснабжения и режимов их эксплуатации.

## SUMMARY

Bogdanovich Maksim Leonidovich

### **Structure-parameter optimization of centralized small and average-scale district heating systems**

**Key words:** structure and parameter optimization, thermal power plant, central district heating system, heat-generating plants and heat networks operating regimes, boiler-house, temperature chart, heat pump plant.

**The aim of the work** is working out engineering and methodical solution on increase of power efficiency and reliability of functioning of centralized small and average-scale district heating systems.

**Method of research:** mathematical modeling and numerical experiment.

#### **The received results and newness**

The scientific substantiation of economic feasibility of existing small-scale steam power plant modernization with application of combined and integrated technologies using a efficiency and economic criteria and an establishment of appeal conditions for each variant from restrictions on the electric power generation is carried out.

The methodology of definition of optimum supply temperature for district heating systems with small-scale steam power plant depending on dynamics of heat load change, level of heat losses and ambient temperature in the conditions of full automated heat consumption and prevailing heat load of household sector is developed.

Analytical expression for definition of fuel system economy at heating boiler-houses modernization to gas-engine heat pump plants depending on boilers efficiency, gas-engine absolute effective efficiency, energy conversion ratio of heat pump, gas-engine fuel utilization factor and heat ratio of peak-load boilers is offered.

**Efficiency:** the results of research have been used at a choice of a reconstruction variant of Gorodeya sugar factory steam power plant, by optimization of work of Pinsk steam power plant and by working out the heat supply development concept of Republic of Belarus till 2020.

**Field of application:** optimization of decisions of heat-generating plants modernisation in the centralised district heating system supply and modes of their operation.

Научное издание

БОГДАНОВИЧ Максим Леонидович

**СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ  
ЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ  
МАЛОЙ И СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальности 05.14.14 – Тепловые электрические станции,  
их энергетические системы и агрегаты

---

Подписано в печать 28.04.2010.

Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная.

Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 1,29. Уч.-изд.л. 1,0. Тир. 60. Зак. 432

---

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Белорусский национальный технический университет.  
ЛИ № 02330/049439 от 16.03.2009.  
Проспект Независимости, 65. 220013, Минск.