

**БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

УДК 621.165:697.34

ЯКОВЛЕВ Борис Владимирович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ
ТЕПЛОФИКАЦИИ И ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ**

05.14.14 – Тепловые электрические станции, их энергетические системы
и агрегаты

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Минск 2004

Работа выполнена в проектно-научно-исследовательском республиканском унитарном предприятии «БЕЛНИПИЭНЕРГОПРОМ».

Официальные оппоненты:

- доктор технических наук, профессор ДЕВОЙНО Александр Николаевич. Белорусский институт радиационной безопасности «БЕЛРАД». Заместитель директора по научной работе;
- доктор технических наук, профессор КУЛАКОВ Геннадий Тихонович. Институт экономики НАН РБ. Главный научный сотрудник;
- доктор технических наук, профессор БАЛАБАНОВИЧ Всеволод Константинович. ООО «ВЕНЕДИКТ». Заместитель директора по научно-технической деятельности.

Оппонирующая организация:

Научно-исследовательское и проектное республиканское унитарное предприятие «БЕЛТЭИ».

Защита состоится «23» сентября 2004 г. в 14⁰⁰. часов на заседании Совета по защите диссертаций Д02.05.01 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220027, г. Минск, пр-т Ф.Скорины, 65, корп. 2, к.201, тел. (8-017) 2399-129.

Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах с подписью, заверенной печатью учреждения, просим высылать по адресу: 220027, г. Минск, пр-т Ф.Скорины, 65, корп. 2, к.201. Ученому секретарю Совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан « » июля 2004 г.

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

В.П.Бубнов

Общая характеристика работы

Актуальность темы диссертации. Теплофикация, или комбинированная выработка электрической и тепловой энергии в одном термодинамическом цикле на теплоэлектроцентрали (ТЭЦ), является основным направлением развития энергетики и рационального использования топлива при производстве энергоносителей. В таком цикле топлива расходуется на 25-30% меньше, чем при раздельной выработке электроэнергии на конденсационной электростанции (КЭС), а теплоты в котельной.

Поэтому вопросы совершенствования и повышения эффективности систем теплофикации и теплоснабжения (их оборудование, параметры, надежность, режимы использования) являются актуальными на всех временных этапах развития энергетики, приобретая в новых технических и экономических условиях иной количественный и качественный уровень, имеют особую актуальность для белорусской энергетики, где 58% генерирующих мощностей приходится на ТЭЦ, а срок службы у 60% котлотурбинного оборудования составляет 20-25 лет (расчетный физический ресурс) и более.

Причем возможности совершенствования как нового, так и действующего основного оборудования тепловых электростанций (ТЭС) далеко не исчерпаны. Многие сделано и делается энергомашиностроительными заводами, научно-исследовательскими, проектными и специализированными организациями, вузами. Определенный вклад в решение проблем совершенствования теплофикационных турбин, создания базово-маневренных ТЭЦ, использования конденсационных электростанций на органическом и ядерном топливе в качестве источников теплоснабжения, создания экономичных систем транспорта теплоты, а также развития в современных условиях малой теплофикации вносят теоретические и экспериментальные исследования и практические разработки (доведенные до реализации) автора, являющиеся предметом данной диссертации.

Связь работы с крупными научными программами, темами.

Основанием для выполнения диссертационной работы являлись:

Целевая комплексная научно-техническая программа ГКНТ ОЦ.002:

- задание Г.07 «Провести научно-исследовательские работы для создания нового оборудования и технологических циклов систем централизованного теплоснабжения, обеспечивающих развитие энергетики до 1990 г.»;

- задание 04 "Разработать и внедрить новые высокоэффективные конструкции тепловых сетей для подземных и надземных прокладок";

- задание НЗ "Провести подготовительные научно-исследовательские работы по созданию систем централизованного теплоснабжения с транспортом тепла в химически связанном виде и разработать ТЭД";

- задание 06.02 «Разработать и освоить маневренные режимы серийных теплофикационных турбин с целью использования ТЭЦ для регулирования графика электрических нагрузок».

Отраслевая научно-техническая программа Минэнерго СССР ОНТП 01.01.05 на 1986-1992 годы «Повышение маневренности тепловых электростанций».

Республиканская научно-техническая программа 71.02Р «Создать и внедрить в народное хозяйство Белорусской ССР новые энергосберегающие технологии и технику и осуществить комплекс мероприятий, обеспечивающих снижение энергоемкости производства и эффективное использование топливно-энергетических ресурсов» на 1991-1995 годы, а также программа "Интенсификация", раздел "Энергия", тема ГБ-86-27 "Повышение маневренности, надежности, оптимизация режимов и совершенствование контроля и управления ТЭС и АЭС».

Энергетическая программа Республики Беларусь на период до 2010 года: Утв. Пост. СМ РБ от 29.10.92, №654.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является создание новых теоретических и практических подходов и основ, способствующих повышению эффективности функционирования систем теплофикации и теплоснабжения, проявляющейся в экономии ТЭР и снижении энерго- и материалоемкости ВВП в стране. Задачи исследований включают:

1. Разработку методических основ выбора оптимальных параметров отборов паровых турбин для ступенчатого подогрева сетевой воды с учетом режимных и конструктивных факторов.

2. Термодинамические и газодинамические исследования нового принципа выполнения отопительных отборов паровых турбин для ступенчатого подогрева сетевой воды.

3. Разработку технических, схемных и режимных решений по повышению эффективности использования действующих физически и морально стареющих паротурбинных установок на основе газодинамических и тепловых испытаний натуральных теплофикационных и конденсационных турбин.

4. Разработку теоретических основ и технических решений по возможному использованию паротурбинных блоков конденсационных тепловых электростанций (КЭС, АЭС) в качестве теплофикационных в системах теплоснабжения с дальним транспортом теплоты.

5. Разработку теоретических основ и технических решений по созданию базово-маневренных ТЭЦ, обеспечивающих конкурентоспособность теплофикации на органическом топливе и регулирование графика электрических нагрузок энергосистем в условиях структурного изменения генерирующих мощностей.

6. Разработку стратегии и создание паротурбинных блочных теплофикационных турбоустановок мощностью 500-3500 кВт для развития малой теплофикации, а также разработку методических основ выбора профиля паровой турбины в составе небольших теплофикационных парогазовых установок (ПГУ).

7. Теоретические и экспериментальные исследования по созданию экономичных и надежных конструкций теплопроводов водяных тепловых сетей, включающие: разработку модели прогнозирования коррозионной повреждаемости трубопроводов и способа ее предотвращения в канальных сетях; создание и освоение трубопроводов с новым принципом компенсации тепловых удлинений; разработку методики технико-экономических обоснований и рекомендаций по применению различных конструкций теплопроводов (канальных, предизолированных бесканальных и др.) в конкретных условиях; разработку теоретических основ, методики и схемы применения нового метода (экспресс-метода) испытаний тепловых сетей на тепловые потери через изоляцию трубопроводов; теоретические и экспериментальные исследования и разработку рекомендаций по возможному применению в тепловых сетях водяного теплоносителя, активированного специальными добавками, с целью снижения гидравлического сопротивления при транспорте теплоносителя.

Объект и предмет исследования. Объектом исследований являлись тепловые электрические станции (ТЭЦ, КЭС, АЭС) и системы транспорта теплоты от источника к потребителю. Предметом исследований являлись теплофикационные турбоустановки различного назначения и водяные тепловые сети.

Гипотеза. В данной работе системная гипотеза и научное предположение касались следующих разработок.

1. Принципиально нового конструктивного выполнения отопительных отборов (признанного изобретением в виде независимых потоков пара – двухпоточных ассиметричных цилиндров (для двухступенчатого подогрева сетевой воды), признанное изобретением.

2. Модернизации морально и физически стареющих действующих конденсационных турбин с целью повышения их экономичности и prolongation ресурса использования в части выбора оптимальной схемы модернизации турбоустановки и определения оптимальных режимов организации ступенчатого подогрева сетевой воды (конденсатор-подогреватели отборов).

3. Приданию ТЭЦ, мощность которых составляет 30-50% от установленной электрической мощности энергосистем, кроме энергоснабжающих, регулировочных функций. Для чего необходимо выявить возможную глубину разгрузки котлов и турбин и выбрать (разработать) оптимальные маневренные технологические схемы.

4. Нового метода (признанного изобретением) испытаний тепловых сетей на тепловые потери, по которому на стадии теоретических предположений были определенные сомнения в части его реальных функциональных возможностей.

5. Применения в тепловых сетях трубопровода принципиально новой конструкции, обладающего непрерывной термической и механической компенсацией, в части реальной компенсирующей способности гофра и его надежности при циклической работе.

Методология и методы проведенного исследования. Проблемы повышения эффективности оборудования и элементов систем теплофикации и теплоснабжения связаны с решением широкого круга теоретических и практических задач, что обусловило соответственно применение различных методов исследований:

1. Математического моделирования газодинамических и тепловых процессов, протекающих в проточной части турбины.
2. Вариантных и аналитических методов (для подтверждения достоверности результатов исследований) выбора оптимальных термодинамических, физических и конструктивных параметров турбоустановок различного назначения, а также прогностических методов для систем транспорта теплоты.
3. Экспериментальной проверки теоретических предположений и расчетов, связанных с созданием самокомпенсирующихся трубопроводов и средств защиты тепловых сетей от наружной коррозии; с применением нового метода испытаний тепловых сетей на тепловые потери и активированного водяного теплоносителя, требующего меньших затрат энергии на его транспорт и др.
4. Стендовых (в заводских условиях) тепловых и механических испытаний первых образцов блочных паротурбинных установок, создаваемых для систем малой теплофикации.

Таким образом, достоверность и обоснованность результатов исследований обеспечивается и подтверждается: использованием в выполненных работах современных методов экономико-математических исследований; экспериментальной и практической проверкой теоретических положений и технических предложений непосредственно на действующем оборудовании электростанций, крупномасштабном теплогидравлическом стенде и в действующих теплосетях; опытом практического использования разработанных рекомендаций, технических и технологических решений, а также полученными на них авторскими свидетельствами.

Научная новизна и значимость полученных результатов. Научная новизна заключается в разработке новых теоретических основ, схем и технологий, использование которых обеспечивает решение крупной прикладной проблемы дальнейшего повышения системной эффективности теплофикации и централизованного теплоснабжения на основе создания вы-

сокоэффективного основного оборудования и технологических схем ТЭЦ, а также надежных и экономичных систем транспорта теплоты.

Впервые получены следующие значимые результаты:

- исследовано влияние режимных, климатических и конструктивных факторов, а также параметров теплоснабжения на эффективность использования турбин со ступенчатым подогревом сетевой воды, что позволило впервые разработать комплексную методику выбора оптимальных параметров отопительных отборов и сетевых подогревателей турбин и предложить более совершенное конструктивное выполнение отборов, существенно повышающее эффективность теплофикационных турбин;

- предложено и обосновано создание базово-маневренных ТЭЦ, как эффективное направление развития и функционирования энергетики в условиях структурной перестройки энергосистем и дефицита маневренных мощностей. Разработаны технологические схемы и методы оптимизации профиля и параметров основного оборудования базово-маневренных ТЭЦ;

- предложен и обоснован один из возможных подходов к ускорению решения проблемы развития атомной теплофикации крупных городов и агломераций за счет использования в качестве источников теплоснабжения действующих и строящихся АЭС. На основе разработанной экономико-математической модели выявлены оптимальные параметры и технические решения систем теплоснабжения с АИТ, включая водо-тепло-электроцентрали (АВТЭЦ) и системы дальнего транспорта теплоты в химически связанном виде;

- разработаны технические и технологические решения, обеспечивающие высокую надежность и экономичность водяных тепловых сетей. Теоретически обоснованы и впервые предложены методы прогнозирования коррозионной повреждаемости тепловых сетей и диагностики состояния их тепловой изоляции. Создана новая конструкция самокомпенсирующегося теплопровода, не имеющая аналогов в мировой практике и впервые внедренная в Минских и Витебских теплосетях; исследованы гидродинамические и теплофизические характеристики активированного специальными добавками водяного теплоносителя, требующего меньше энергии на его транспорт по трубопроводам, и подобраны добавки, удовлетворяющие техническим и экологическим условиям работы тепловых сетей;

- разработана стратегия и исследована конкурентоспособность развития в рыночных условиях комбинированного энергоснабжения на базе высокоэффективных малых и мини-ТЭЦ. Для ее реализации подготовлены технические предложения и на их основе на ОАО «Калужский турбинный завод» (Россия) созданы теплофикационные блочные паротурбинные установки.

Большинство разработанных и внедренных технических решений признано изобретениями.

Практическая значимость полученных результатов.

Прежде всего заключается в доведении всех исследованных в диссертации вопросов до внедрения на тепловых электростанциях и в системах теплоснабжения Белорусской энергосистемы. В частности они использованы заводами и проектными институтами при создании нового основного оборудования и разработке технологических схем базово-маневренных теплофикационных электростанций (Гомельская ТЭЦ-2, Минская ТЭЦ-4, Смоленская ТЭЦ-2 и др.); при модернизации низкоэкономичных паротурбинных установок электростанций (в Белорусской энергосистеме это позволило экономить до 100 тыс. т у.т. в год); при разработке систем теплоснабжения с источниками на органическом и ядерном топливе; при проектировании, строительстве на основе новых технологий и эксплуатации тепловых сетей; при создании высокоэффективных малых и мини-ТЭЦ; при разработке перспективных государственных документов (Программ, Технико-экономических докладов, Концепций) по повышению эффективности и развитию энергетики и систем теплоснабжения. Результаты исследований используются также в учебном процессе при подготовке инженерных и научных кадров. Практическая значимость результатов, полученных в диссертации, является составной частью выполнения основной энергетической и экономической цели в стране – снижение энергоемкости ВВП, величина которого в настоящее время значительно превышает таковую в индустриально развитых странах. Суммарная ориентировочная ежегодная экономия топлива от разработок автора оценивается в 200-250 тыс. т у.т.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту. Комплекс теоретических и практических разработок, обеспечивающих повышение системной эффективности теплофикации; создание высокоэкономичных новых теплофикационных турбин; повышение экономичности использования действующих паротурбинных установок в системах теплофикации, а также совершенствование систем транспорта теплоты от источника теплоснабжения к потребителям, охватывающий:

- теоретические основы нового подхода к выбору параметров теплофикационных отборов паровых турбин со ступенчатым подогревом сетевой воды; термодинамических параметров и характеристик маневренных паротурбинных теплофикационных блоков; параметров систем транспорта теплоты; профиля паровой турбины в составе небольших теплофикационных парогазовых установок; оптимального варианта энергоснабжения;

- новые методы прогнозирования коррозионной повреждаемости и тепловой диагностики тепловых сетей;

- результаты модельных и натурных экспериментальных исследований, способствующих созданию новой конструкции теплопровода с непрерывной компенсацией его тепловых удлинений; разработке нового метода испытаний тепловых сетей на тепловые потери; практическому примене-

нию в тепловых сетях активированного водяного теплоносителя, снижающего гидравлическое сопротивление трубопроводов;

- технические и схемные решения по новому конструктивному выполнению отопительных отборов в крупных паровых турбинах; малым блочным теплофикационным паротурбинным установкам; маневренным теплофикационным паротурбинным установкам и технологии их разгрузки; модернизации конденсационных турбин в теплофикационные.

Личный вклад соискателя. Автор самостоятельно выполнял, а также руководил всеми обобщенными в данной диссертации работами. Наиболее существенным личным вкладом в полученные результаты является:

- обоснование критериев и разработка методики выбора оптимальных параметров теплофикационных отборов у турбин со ступенчатым подогревом сетевой воды, а также схем реконструкции и режимов использования низкоэкономичных теплофикационных и конденсационных турбин, переводимых на теплофикационное противодавление;

- создание более эффективной, используемой в мировой практике турбостроения конструкции турбоустановки с независимыми отборами пара для ступенчатого подогрева сетевой воды;

- обоснование возможностей повышения системной эффективности теплофикации на органическом топливе в условиях изменения структуры генерирующих мощностей энергосистем на основе базово-маневренных ТЭЦ, обеспечивающих покрытие необходимых тепловых и переменных электрических нагрузок энергосистем;

- разработка новой технологии, обеспечивающей работу ТЭЦ в маневренном режиме с минимальной выдаваемой мощностью. Разработка физической модели оптимизации параметров и профиля основного оборудования маневренных ТЭЦ;

- разработка технико-экономической модели обоснования оптимальных параметров теплоснабжения от АИТ и схем модернизации турбин АЭС в теплофикационно-конденсационные;

- обоснование профиля и энергоресурсосберегающей эффективности атомных водо-тепло-электроцентралей;

- разработка теоретической модели прогнозирования коррозионной повреждаемости подземных теплопроводов и методики выбора параметров технических средств их защиты от коррозии;

- разработка теоретических основ и технологической схемы полномасштабного многофункционального теплогидравлического стенда, обеспечивающего экспериментальные исследования по физическим и техническим проблемам эффективности и надежности систем транспорта теплоты. Подготовка научных программ экспериментальных работ;

- разработка теоретической модели нового экспресс-метода испытания тепловых сетей на тепловые потери;

- разработка методических основ расчета оптимального температурного графика работы системы теплоснабжения;
- постановка исследований на натуральных и экспериментальных моделях по выявлению оптимальных геометрических и энергетических характеристик самокомпенсирующихся теплопроводов;
- технико-экономическое обоснование и технические предложения по практическому применению тепловых сетей активированного специальными добавками водяного теплоносителя;
- разработка стратегии и методики обоснования эффективности технического перевооружения тепловых сетей на основе теплогидропроектированных теплопроводов;
- выявление потенциальных возможностей, разработка методических основ и исследование эффективности применения малых и мини-ТЭЦ с паротурбинными и газотурбинными агрегатами в условиях Беларуси. Обоснование мощностного ряда и профиля малых блочных теплофикационных паротурбинных установок на низких начальных параметрах пара, подготовка технического задания на создание малых турбоустановок.

В целом результаты исследований и разработок автора вносят значительный вклад в теорию и практику обоснования и выбора оптимальных решений при создании основного оборудования теплофикационных электростанций и систем теплоснабжения.

Апробация результатов диссертации. Основные положения работы и результаты выполненных исследований на протяжении 70-90-х годов докладывались: на различных энергетических всесоюзных (бывшего СССР) и республиканских научно-технических конференциях и симпозиумах, на академических и вузовских научных семинарах и конференциях (Минск, Москва, С.-Петербург, Киев, Саратов, Екатеринбург, Иркутск, Донецк, Иваново, Симферополь); на научно-технических советах Минэнерго и Минэнергомаши СССР, ВТИ, ЦКТИ, Белглавэнерго, ВНИПИ-энергопрома, Теплоэлектропроекта, Гидропроекта; на рабочих семинарах по электроэнергетике стран-членов СЭВ и в специализированных в области теплофикации и теплоснабжения фирмах Венгрии, Германии, Дании, Польши, Чехии.

Опубликованность результатов. Результаты диссертационной работы опубликованы во включенных в автореферат монографии [89], 68 статьях в научных журналах и сборниках, 3 тезисах к докладам и выступлениям на конференциях, 3 справочных пособиях [3, 17, 77], 3 учебных пособиях [1, 66, 87], 11 авторских свидетельств к изобретениям. Общий объем публикаций – 2397 с., в том числе без соавторов – 1025 с.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, семи глав, заключения, перечня использованных источников и приложений. Полный объем диссертационной рабо-

ты 471 с., в том числе 107 иллюстраций на 62 с., 26 таблиц на 26 с., 4 приложений на 16 с., 291. использованный источник на 20 с.

Содержание диссертационной работы

Во введении освещена роль теплофикации в сфере энергетики и энергосбережения. Отмечен вклад в формирование науки о теплофикации, создание оборудования и теплофикационных систем советских ученых и специалистов (В.В. Дмитриев, Л.Л. Гинтер, Л.А. Мелентьев, С.Ф. Копьев, Е.Я. Соколов, Е.Ф. Бродский, Н.К. Громов, Е.П. Шубин, Б.П.Таранов, Г.Б. Левенталь, Л.С. Попырин, А.И. Андрющенко, Л.С.Хрилев, Ю.М.Хлебалин, Р.З.Аминов, Ю.Е.Николаев, Д.Т.Аршакян, В.Я.Хасилев, Н.М.Зингер, В.С.Бунин, Д.П.Бузин, Е.И.Бененсон, Д.М.Будняцкий, А.А.Мадоян, В.И.Шарапов, В.М.Боровков, В.П.Корытников, Я.А.Ковылянский, М.М. Пик, В.И. Длугосельский, Б.Н.Громов, И.А.Смирнов и др.), коллективов ВТИ, ЦКТИ, СЭИ, ЭНИН, ВЭП, ТЭП, УТМЗ, ЛМЗ, ХТГЗ, ОРГРЭС, а также белорусской школы энергетиков (Н.П.Волков, Г.Б.Пекелис, А.М.Леонков, А.Д.Качан, А.П.Борушко, Л.П.Падалко, В.К.Балабанович, В.Б.Нестеренко, П.Н.Кнотько, А.Я.Простак, В.П.Бразовский, И.И.Ровек, Г.К.Подворный, В.В.Болкунец, В.И.Трутаев, А.Н.Рыков, В.М.Сыропушинский, А.К.Внуков, Ф.И.Молочко, А.Н. Бачуринский, Н.М. Черковский и др.). Подчеркнуто, что в основных направлениях экономического и социального развития республики Беларусь на период до 2010 года и далее определяющая роль отводится электроэнергетической отрасли, где серьезное внимание уделено эффективному функционированию и развитию теплофикации и теплоснабжения с применением современной техники и энерготехнологий как при модернизации действующих, так и сооружении новых энергоисточников. Разработаны соответствующие Программы и документы и несомненную пользу в этом оказывают исследования и разработки данной диссертации.

В первой главе «Технико-экономические аспекты теплофикации на современном этапе» рассмотрены:

1. Достижения и проблемы функционирования теплофикации в нынешних экономических условиях, а также возможности повышения ее системной эффективности за счет совершенствования и улучшения экономичности и надежности всех звеньев теплоснабжающей системы - ТЭЦ, тепловых сетей, теплоиспользующих установок, и введения экономических механизмов, стимулирующих как производителя, так и потребителя тепловой и электрической энергии при их комбинированном производстве. Намечены пути повышения эффективности теплофикации, нашедшие отражение и решение в настоящей диссертации.

2. Сопоставимость результатов технико-экономической оптимизации и выбора оптимальных решений в энергетике по ранее действующей в плановой экономике методике и ныне применяемым в рыночной экономи-

ке. Выявлено, что в качественном плане они являются адекватными, что показывают тестовые расчеты по оптимизации параметров, к примеру, энергоустановок, оборудования базово-маневренных ТЭЦ, систем теплоснабжения и др. Однако в специфических задачах выбора решений в энергетике в условиях возможной неопределенности целесообразно применять методы вероятностной оценки риска.

3. Современный метод анализа эффективности инвестиционных проектов, где основными критериями оценки являются: чистый дисконтированный доход (NPV); коэффициент чистого дисконтированного дохода, или индекс доходности (KNPV); коэффициент выгоды-затраты (B/C); внутренняя норма рентабельности (IRR, или $E_{вн}$); срок возврата капитала. Показано, что в условиях дефицита материальных ресурсов и трудностей получения кредитов для строительства и модернизации объектов энергетики, что характерно для Беларуси и стран СНГ, в качестве основного критерия финансовой оценки эффективности и приоритетности проектов следует принять дисконтированную за срок службы объекта прибыль Π на единицу капитальных вложений K , или индекс доходности (KNPV)

$$K_{п} = \frac{\sum_{t=1}^T \Pi_t}{\sum_{t=1}^T K_t} . \quad (1)$$

Очевидно, что при одинаковом для сравниваемых объектов сроке службы его максимум будет соответствовать максимуму значений критериев NPV, B/C, IRR и минимуму срока окупаемости.

Основой для определения прибыли (дохода) при эксплуатации объекта может быть значение средней за срок службы объекта себестоимости отпускаемой электроэнергии $c_э$, метод нахождения которой, а также индекса доходности $K_{п}$, приводится в диссертации. К примеру, при отнесении части стоимости применяемой энергоустановки на отпуск тепловой энергии

$$c_э = \left[\frac{\rho}{h_{уст}} (K_{уд}^{рек} - \frac{\Delta Q_{рек}}{N_{рек}} K_{уд}^{кот}) + b_э^{отп} \cdot c_T \right] (1 + f), \quad (2)$$

где ρ – коэффициент, учитывающий ставку дисконтирования (обычно 0,1), страховые выплаты, годовой налог, затраты на текущий ремонт и техобслуживание. В среднем $\rho=0,17$; $h_{уст}$ – число часов использования в году вводимой электрической мощности; $K_{уд}^{кот}$, $K_{уд}^{рек}$ – удельные капвложения в замещающую котельную и реконструкцию ТЭС при отнесении их на получаемую электрическую мощность $N_{рек}$; $\Delta Q_{рек}$ – увеличение тепловой мощности реконструируемого объекта. При наличии резерва тепловой мощности в системе теплоснабжения $\Delta Q_{рек}=0$; $b_э^{отп}$ – удельный расход топлива на отпуск электроэнергии от вводимой установки; c_T – цена единицы используемого топлива; f – доля заработной платы в себестоимости электроэнергии.

На основе данных методических положений рассматривалась эффективность применения новых технологий в тепловых сетях, малых паротурбинных и парогазотурбинных установок, а также модернизации ПГУ Оршанской ТЭЦ (главы 6, 7).

4. Методы и критерии оптимизации, примененные в настоящих исследованиях. В частности обосновано, что в новых экономических условиях объективным однозначным показателем оценки энергетической эффективности теплофикации, одновременно определяющим уровень экономии топлива в энергосистеме, является удельный расход топлива на отпуск тепловой энергии, найденный при экономичном методе распределения топливных затрат на производство электрической и тепловой энергии на ТЭЦ:

$$b_Q^{\text{эк}} = b_Q^{\text{ф}} - \frac{\mathcal{E}_{\text{отп}} \cdot (b_{\text{зам}} - b_{\text{э(ТЭЦ)}})}{Q_{\text{отп}}} = \frac{V_{\text{ТЭЦ}} - \mathcal{E}_{\text{отп}} \cdot b_{\text{зам}}}{Q_{\text{отп}}}, \quad (3)$$

где $\mathcal{E}_{\text{отп}}$, $Q_{\text{отп}}$ - отпущенные от ТЭЦ электроэнергия и теплота; $V_{\text{ТЭЦ}}$ - полный расход (за рассматриваемый период) топлива на ТЭЦ; $b_{\text{зам}}$, $b_{\text{э(ТЭЦ)}}$ - удельные расходы топлива на отпуск электроэнергии от замещающей (наиболее экономичной) КЭС энергосистемы и ТЭЦ; $b_Q^{\text{ф}}$ - удельный расход топлива на отпуск тепловой энергии от ТЭЦ при физическом методе распределения топливных затрат.

Величина $b_Q^{\text{эк}}$ реально отражает эффект от проводимых энергосберегающих мероприятий за счет применения новой техники и технологии, повышения технико-экономического уровня эксплуатации оборудования, оптимизации режимов работы оборудования и ТЭЦ в целом. Она может использоваться в качестве планового показателя эффективности работы ТЭЦ в энергосистеме, а также показателя, стимулирующего потребителей тепловой энергии и способствующего этим сохранению и развитию систем теплофикации, что начинает осваиваться в России и Беларуси.

Во второй главе «Совершенствование теплофикационных паровых турбин с отопительными отборами пара» исследована эффективность работы существующих турбин типа Т в системе теплоснабжения, выявлены возможности их совершенствования и более эффективного использования. На основании предложенных аналитических методик определены условия осуществления термодинамически оптимального ступенчатого подогрева сетевой воды у турбин, не имеющих и имеющих промежуточный перегрев пара и впервые исследовано влияние конструктивных и режимных факторов на осуществление и эффективность ступенчатого подогрева сетевой воды. Это техническое выполнение и расчетные параметры отборов, число ступеней подогрева, соотношение поверхностей нагрева сетевых подогревателей по ступеням, экономичность работы проточной части турбины в зоне отопительных отборов, наличие и режимы использования конденса-

ционного потока пара, вид системы теплоснабжения и ее температурный график, соотношение нагрузки горячего водоснабжения и отопления $\gamma_{г.в.}$, часовой коэффициент теплофикации $\alpha_{ТЭЦ}^{час}$, климатические условия.

Наибольшая выработка электроэнергии на тепловом потреблении за отопительный период достигается при сохранении оптимального (примерно одинакового) соотношения подогрева сетевой воды по ступеням на всем протяжении изменения температурного графика теплосети (линия t_{cl}^{opt} , рис.1).

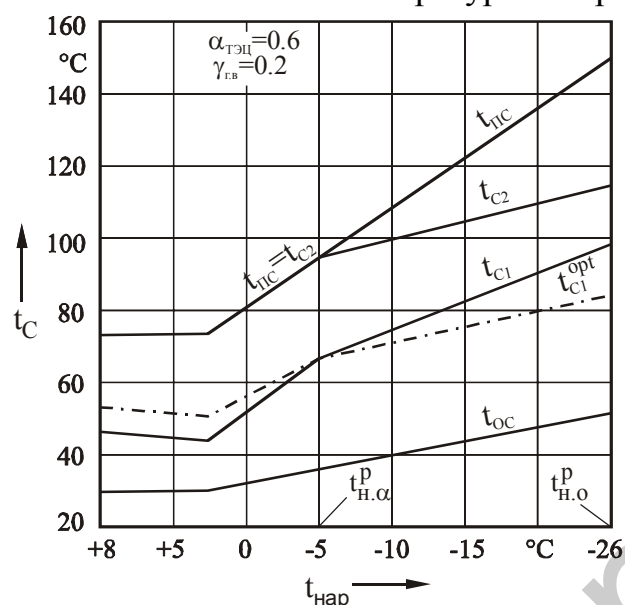


Рис. 1. Изменение подогрева сетевой воды по ступеням турбины в зависимости от температуры наружного воздуха $t_{нар}$: t_{oc} , t_{c1} , t_{c2} , $t_{тс}$ - температура сетевой воды соответственно обратной, после подогревателей первой и второй ступеней подогрева турбины и прямой; $t_{н.о}^p$, $t_{н.α}^p$ - расчетная наружная температура отопления и включения пиковых котлов

Практически же это условие неосуществимо (линия t_{c1}) при традиционном выполнении выводов отопительных отборов из общего потока пара, как это обычно осуществляется в турбинах. В итоге выработка электроэнергии оказывается на 2-3% меньше теоретически возможного ее увеличения по сравнению с одноступенчатым подогревом (7-15% при двух-трехступенчатом подогреве), что на каждые 100 МВт теплофикационной мощности турбины приводит к перерасходу в энергосистеме 1,2–1,5 тыс. т у. т.

Показано, что эффективность теплофикационных турбин со ступенчатым подогревом сетевой воды существенно зависит прежде

всего от правильного выбора расчетных параметров (мест) отопительных отборов, определяемого совокупностью исходных режимных и конструктивных факторов, отмеченных выше.

Выполненные по разработанной автором универсальной методике комплексные исследования показали, что наибольшая выработка электроэнергии турбиной за отопительный период достигается при выборе расчетных параметров отборов для ступенчатого подогрева сетевой воды по базовому режиму на температурном графике системы теплоснабжения, соответствующему наружной температуре $t_{н.отб}^p = t_{н.α}^p$ (рис. 1), т.е. режиму полной загрузки отборов турбины при минимальных для заданных условий давлений пара в отборах и равном подогреве сетевой воды по ступеням. Указанная температура может быть найдена из выражений, °C:

$$t_{\text{н.отб}}^{\text{р}} = t_{\text{вн}}^{\text{р}} - \left[\alpha_{\text{ТЭЦ}}^{\text{час}} (1 + \gamma_{\text{Г.В}}) - \gamma_{\text{Г.В}} \right] (t_{\text{вн}}^{\text{р}} - t_{\text{н.о}}^{\text{р}}); \quad (4)$$

$$t_{\text{н.отб}}^{\text{р}} = 8 - (8 - t_{\text{н.о}}^{\text{р}}) \left[\frac{\alpha_{\text{ТЭЦ}}^{\text{час}}}{\alpha_{\text{ТЭЦ}}^{\text{год}}} (1 + \gamma_{\text{Г.В}}) \right]^{\text{X}}, \quad (5)$$

где $t_{\text{вн}}^{\text{р}}$ - расчетная температура воздуха внутри отапливаемых помещений, °С; 8 - температура наружного воздуха, соответствующая началу отопительного периода, °С; $\alpha_{\text{ТЭЦ}}^{\text{год}}$ - годовой коэффициент теплофикации; X - величина постоянная для конкретной климатической зоны.

Установлено, что при создании турбины только одной модификации с некоторыми стандартными параметрами отопительных отборов пара необходимо выявить средние условия их выбора, чтобы недовыработка электроэнергии в нерасчетных режимах ее работы не превышала 1%. Вместе с тем, учитывая значительное различие реальных условий, определяющих выбор оптимальных параметров отопительных отборов, целесообразно иметь две-три модификации турбоустановки одной мощности, отличающиеся только расчетными параметрами отопительных отборов пара (характеристикой теплофикационного отсека), что мало сказывается на конструктивном выполнении проточной части и, соответственно, стоимости турбоустановки и быстро окупается.

Предложен также новый методический подход к выбору сетевых подогревателей турбин со ступенчатым подогревом сетевой воды.

Исследовано термоэкономически и технически целесообразное число ступеней подогрева сетевой воды у крупных турбин, которое практически определяется условием

$$Z = \frac{\Delta t_{\text{тур}}^{\text{р}}}{(25 \dots 30)}. \quad (6)$$

где $\Delta t_{\text{тур}}^{\text{р}}$ - общий расчетный нагрев сетевой воды в подогревателях турбины, °С. В существующих системах теплоснабжения с температурным графиком 150/70°С и $\alpha_{\text{ТЭЦ}}^{\text{час}} = 0,5-0,6$ $\Delta t_{\text{тур}}^{\text{р}} = 45-55^{\circ}\text{С}$, что оправдывает применение только двухступенчатого подогрева сетевой воды, который реализован на крупных отечественных теплофикационных турбоустановках.

Проведенные всесторонние исследования особенностей работы теплофикационных турбин со ступенчатым подогревом сетевой воды позволили предложить принципиально новое выполнение отопительных отборов в виде независимых потоков пара (2, 3-х и более в зависимости от числа ступеней подогрева), что существенно повышает эффективность и режимные возможности турбины. Конструктивно отборы выполняются в виде отсеков в двухпоточных асимметричных цилиндрах (рис.2) с числом ступеней в них, определяемым расчетным давлением пара в камере отопительного отбора и общим давлением перед отсеками, что оптимизируется.

Турбины с независимыми отопительными отборами могут быть типа ТР электрической мощностью 55-110 МВт и типа Т и ТК мощностью 110-500 МВт. Тип и мощность турбины определяют структурное выполнение ее проточной части. Значительное увеличение выработки электроэнергии на тепловом потреблении (на 3-4 %) и повышение экономичности использования конденсационного потока у такой турбины в отопительный период обеспечивают экономию 3000-3500 т у. т. на одну турбоустановку электрической и тепловой мощностью соответственно 110 и 200 МВт.

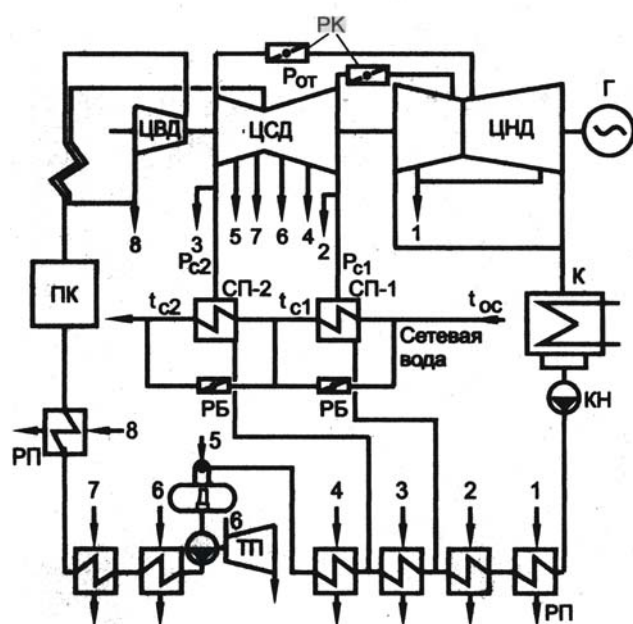


Рис. 2. Теплофикационная турбина типа Т(ТК) с двухступенчатым подогревом сетевой воды от независимых отборов пара (с двухпоточными ассиметричными ЦСД и ЦНД)

Отметим, что, начиная с 1980-х годов, всеми ведущими западными турбостроительными фирмами реализуется такой же принцип структурного выполнения теплофикационных и теплофикационно-конденсационных турбин. Польша, входя в свое время в СЭВ, заимствовала патент СССР (автора) при создании турбины типа ТР мощностью 50 МВт и типа Т мощностью 110 МВт с двухступенчатым подогревом сетевой воды. Она же поставляла эти турбины в Венгрию и Чехословакию.

В третьей главе «Повышение эффективности использования действующих паротурбинных установок тепловых электростанций» рассматриваются актуальные вопросы повышения эффективности использования морально и физически стареющих действующих энергетических установок, что определяется не только необходимостью улучшения их технико-экономических показателей при работе в новых условиях, но и продления срока службы с обеспечением надежности работы оборудования. Причем это в равной мере характерно как для теплофикационных, так и конденсационных электростанций.

Показано, что при переводе турбин типа Т и ПТ с одной ступенью подогрева на теплофикационное противодавление (ухудшенный вакуум) с организацией двухступенчатого подогрева (первая ступень – конденсатор, вторая – подогреватель отопительного отбора) максимум выработки электроэнергии на базе теплового потребления может быть получен лишь при поддержании оптимальных режимов подогрева сетевой воды по ступеням,

поскольку проточная часть и параметры отопительных отборов этих турбин не соответствуют измененным условиям работы.

Для оптимизации режимов необходимы характеристики экономичности работы проточной части турбины (предотборные ступени, отсек ЧНД), а при их отсутствии изменение экономичности работы ступеней можно оценить через КПД по полученной нами формуле

$$\eta_{oi} = \eta_{oi}^p \left[1 - \left(\sqrt{\frac{H_o^p}{H_o}} - 1 \right)^2 \cdot a \right],$$

где H_o, H_o^p – располагаемый теплоперепад на отсек ступеней в рассматриваемом и расчетном режимах (при расчетном КПД η_{oi}^p); a – постоянный коэффициент, зависящий от числа ступеней в отсеке и их конструктивных характеристик. Для предотборного и теплофикационного отсеков $a = 0,7-0,8$, для отсека ЧНД $a = 0,9-1,1$.

Исследования показали, что при работе ЧНД с положительным КПД максимуму выработки электроэнергии на ступенчатом подогреве соответствует режим свободного парораспределения по ступеням подогрева – полностью открыта диафрагма ЧНД. При этом выработка электроэнергии на базе теплового потребления увеличивается за отопительный период на 10-12% по сравнению с одноступенчатым подогревом при минимальном давлении в отборе 0,12 МПа. Их них 2–3% выработки дает снятие одной-двух неработающих с положительной мощностью последних ступеней.

Расчеты и испытания показывают, что у турбин Т и ПТ мощностью до 40 МВт, переводимых на теплофикационное противодавление, целесообразно снимать последнюю ступень. Что касается турбин мощностью 50-110 МВт, то целесообразность перевода их в режим теплофикационного противодавления и выбор схемы модернизации определяются конструктивными особенностями и показателями работы турбин по графику электрических и тепловых нагрузок.

Эффективность работы теплофикационных турбин по графику электрических нагрузок характеризуется относительным приростом расхода теплоты на выработку электроэнергии:

$$r = \frac{dQ_o}{dN_T} = \frac{dQ_3}{dN_T},$$

где Q_o, Q_3 - расход теплоты в свежем паре и на выработку электроэнергии, $Q_3 = Q_o - Q_T$; N_T, Q_T - мощность турбины и ее тепловая нагрузка.

Как показывают исследования, турбины УТМЗ типа Т и ПТ мощностью 50-110 МВт не могут эффективно использоваться на конденсационных режимах, и в большинстве случаев при избыточном балансе мощностей энергосистемы оправданным является их перевод в режим теплофи-

кационного противодействия с удалением последней ступени и организацией трехступенчатого подогрева сетевой воды (конденсатор, нижний и верхний подогреватели), что примерно на 3% увеличивает мощность турбины. В то же время турбины ПТ-60-130/13 ЛМЗ, имеющие одновенечную регулируемую ступень в ЧВД и развитую ЧНД и этим более приемлемые для работы по электрическому графику, при определенных условиях, например, при недостаточной тепловой нагрузке, могут эффективно участвовать в регулировании графика электрических нагрузок энергосистемы, и их перевод в режим теплофикационного противодействия с удалением последней ступени не всегда оправдан.

Значительное внимание в этой главе уделено возможному использованию конденсационных электростанций для теплоснабжения населенных и промышленных зон, для которых требуются крупные тепловые мощности (300-1500 МВт) в сетевой воде. Сформулированы основные требования к использованию КЭС в качестве источников централизованного теплоснабжения и представлены базисные циклы превращения (модернизации) конденсационных турбин в теплофикационные, суммированные по качественным показателям. По ним с участием Харьковского филиала ЦКБ Главэнергоремонта модернизированы многие турбины мощностью 25-150 МВт, в том числе на Жодинской, Светлогорской и Березовской станциях Беларуси. Показано, что экономическое предельное расстояние передачи теплоты от реконструируемой КЭС до пиковой котельной, расположенной в зоне теплоснабжения, зависит от многих факторов (типа и стоимости системы транспорта теплоты; сочетаний видов топлива и его стоимости на источниках централизованного теплоснабжения; величины тепловой нагрузки; типа и схемы реконструкции турбины, а также режимов ее работы по тепловому и электрическому графикам) и в среднем может быть в пределах 15-20 км при двухтрубном транспорте теплоты и 30-60 км при однотрубном. Внедрение приведенных разработок автора в Белорусской энергосистеме позволяет экономить до 100 тыс. т у.т. в год.

В четвертой главе «Создание базово-маневренных ТЭЦ» приводятся результаты теоретических и практических разработок по повышению системной эффективности теплофикации в условиях функциональной перестройки топливно-энергетического комплекса энергосистем.

Развитие тепловой энергетики с блоками на закритических параметрах пара и атомной энергетики оказывало сильное влияние на конкурентоспособность теплофикации на органическом топливе даже при строительстве крупных ТЭЦ. Одновременно из-за отсутствия в энергосистемах специальных маневренных электростанций обострялась проблема экономичного и надежного покрытия переменной части графика электрических нагрузок, особенно прохождения спада электропотребления в ночное время и в выходные дни.

В связи с этим нами было выдвинуто предложение о привлечении ТЭЦ, мощность которых составляет 30-50% генерирующих мощностей энергосистем, для возможной работы в маневренном полупиковом режиме, т.е. создании так называемых базово-маневренных ТЭЦ. Решение этой проблемы охватывало три комплекса задач:

- системные исследования возможных масштабов и эффективности использования ТЭЦ в маневренном режиме;
- оптимизацию параметров и профиля основного оборудования маневренных ТЭЦ;
- разработку и практическую реализацию технических решений по использованию ТЭЦ в маневренном режиме.

Кратко осветим их суть и приведем полученные результаты.

На основе разработанных структурной модели технико-экономических исследований, а также целевых функций суммарных топливных и приведенных затрат в энергосистеме установлено, что масштабы и эффективность использования ТЭЦ в маневренных режимах находятся в непосредственной зависимости от экономичности, состояния, структуры и темпов развития электрогенерирующих установок в энергосистеме и что перевод ТЭЦ в маневренный полупиковый режим работы обеспечивает экономию (вытеснение) органического топлива в энергосистеме (порядка 1800 т у.т./год на 1 МВт маневренной мощности), но в то же время приводит к увеличению расхода суммарного первичного энергоресурса, включая ядерное горючее (порядка 700 т у.т./год на 1 МВт). Выявлена экономическая последовательность перевода базовых установок на органическом топливе в маневренный режим: это действующие КЭС, действующие ТЭЦ и новые ТЭЦ.

Принимая во внимание, что турбины, паровые котлы и технологические схемы ТЭЦ создавались для базовых режимов работы, необходимо было выявить их термодинамическое и технико-экономическое соответствие новым условиям работы. Для решения этих задач автором были разработаны совместно с СПИ аналитические методы расчета режимов и комплексной оптимизации параметров основного оборудования базово-маневренных ТЭЦ (турбин, котлов, конденсаторов, градирен), а также параметров теплоснабжения от таких ТЭЦ.

Оптимуму искомого параметра отвечает условие

$$\left(\frac{\delta\Delta Z}{\delta x}\right) = 0 \quad \text{при} \quad \left(\frac{\delta^2\Delta Z}{\delta x^2}\right) > 0,$$

где ΔZ - переменная часть всех затрат с учетом обеспечения надежности работы оборудования и охраны природы.

По турбоустановке определялись оптимальные значения начальных параметров пара (давление, температура) и параметров промежуточного

перегрева пара в зависимости от режимов ее использования (разгрузка, останов) и стоимости топлива (в нынешних условиях 60-70 USD/т у.т.).

На основании выполненных исследований и опыта мировой энергетики рекомендован следующий уровень параметров пара для турбоустановок базово-маневренных ТЭЦ: начальное давление – 16...17 МПа, начальная температура – 545...550°C, давление промперегрева – 5...6 МПа, температура промперегрева 550...560°C. Переход на указанный уровень параметров пара оправдан и для базовых теплофикационных блоков. Критические параметры проблематичны для маневренного оборудования. У маневренной турбины значительно отличаются эксплуатационные параметры и расчетные характеристики конденсатора (давление, кратность и поверхность охлаждения) и градирни.

По котлоагрегату при заданных из условий оптимизации маневренной турбоустановки рабочих параметрах пара и температуре питательной воды оптимизации в основном подлежат физические и технические параметры низкотемпературных поверхностей нагрева котла (подогрев воздуха в калорифере и воздухоподогревателе, температура уходящих газов, скорости газовой и воздушной среды в воздухоподогревателе и его поверхность) с учетом его работы в режиме переменных нагрузок. Как выявлено, они также заметно отличаются от параметров котлоагрегата, работающего с базовой теплофикационной турбиной.

На основании данных и других наших исследований установлено, что оптимальный коэффициент теплофикации для базово-маневренных ТЭЦ оказывается в среднем на 20-25% ниже значений, рекомендуемых для базовых ТЭЦ, и что маневренный режим существенно влияет на оптимальную величину расчетного подогрева сетевой воды на ТЭЦ.

В соответствии с Концепцией развития теплофикации и теплоснабжения бывшего СССР, начиная с 1990 года, ТЭЦ с агрегатами единичной мощностью 110-180 МВт должны были сооружаться только как базово-маневренные. Для накопления опыта проектирования таких ТЭЦ и создания маневренного оборудования были определены две ТЭЦ, на которых предстояло внедрить и освоить режимы работы турбин с глубокой разгрузкой по тепловой и электрической мощности. Это Минская ТЭЦ-4 и Гомельская ТЭЦ-2. К разработке проекта, приспособлению и созданию маневренного оборудования, пусконаладочным и экспериментальным работам были привлечены БО ВЭП, ВЭП, ПО УТМЗ, ПО ЛМЗ, ПО ТКЗ, ПО ЧАЗ, ВТИ, НПО ЦКТИ, Союзтехэнерго, Южтехэнерго, БЭРН.

В результате выполненных исследований и проработок были найдены для заданных условий наиболее эффективные технические решения и технологии разгрузки основного оборудования.

На Минской ТЭЦ-4 в маневренный режим работы были переведены две турбины Т-100-130. Технология разгрузки – за счет специальных паровых сетевых подогревателей. Для этого в тепловую схему введена отдель-

ная дополнительная бойлерная установка, воспринимающая тепловую нагрузку теплофикационных отборов турбины при ее разгрузке (рис. 3,а). В 1985 - 1986 гг. осуществлялась опытная эксплуатация турбин. Глубина их разгрузки по электрической мощности доходила до 30% номинальной. Каких-либо осложнений и нарушений в работе оборудования выявлено не было. В итоге получены важные для практики результаты.

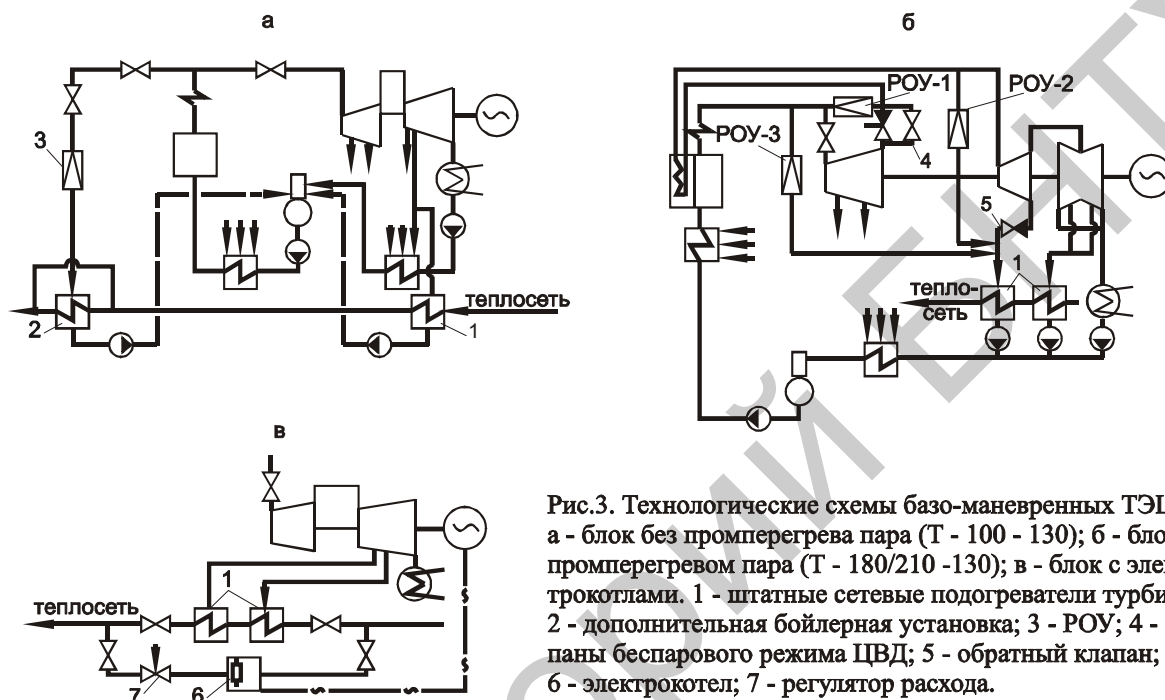


Рис.3. Технологические схемы базово-маневренных ТЭЦ: а - блок без промперегрева пара (Т - 100 - 130); б - блок с промперегревом пара (Т - 180/210 - 130); в - блок с электрокотлами. 1 - штатные сетевые подогреватели турбины; 2 - дополнительная бойлерная установка; 3 - РОУ; 4 - клапаны беспарового режима ЦВД; 5 - обратный клапан; 6 - электродогреватель; 7 - регулятор расхода.

На Гомельской ТЭЦ-2 по проекту устанавливались три теплофикационных блока в составе турбины Т-180/210-130 ПО ЛМЗ и котла ТГМЕ-206 ПО ТКЗ с промперегревом пара. Исходя из конструктивных особенностей турбины и котла здесь оптимальной оказалась двухбайпасная схема работы блока в маневренных режимах с обеспаренным ЦВД, обеспечивающая наибольшую разгрузку блока по электрической мощности (до 18% номинальной) и надежность (рис. 3,б). В качестве разгрузочного парового бойлера использовался верхний сетевой подогреватель турбины, что потребовало установки на отборе специальных обратных клапанов. В технологической схеме блока применен и ряд других оригинальных решений, например, обвод ПВД по питательной воде, обеспечивающий снижение мощности турбины или ее увеличение в часы "пик" без уменьшения отпуска теплоты. Маневренный режим на первом блоке осваивался в 1989 году. Испытания проводились по заложенной технологии его разгрузки и также прошли успешно. Признано, что первый базово-маневренный теплофикационный блок с турбиной Т-180/210-130 удалось создать. Кроме этого, применительно к Гомельской ТЭЦ-2 выполнены исследования и предложены технические решения по использованию аккумулирующей способности транзитных тепловых сетей для расширения регулировочного диапа-

зона турбин не только в сторону уменьшения, но и увеличения их мощности.

Наряду с освоением технологии электрической разгрузки турбин с помощью паровых сетевых подогревателей автором была разработана более эффективная технология разгрузки ТЭЦ, а точнее, уменьшения выдаваемой в энергосистему мощности, с применением в тепловой схеме турбины водогрейных электрокотлов (ЭК), использующих для компенсационного подогрева сетевой воды электроэнергию, вырабатываемую ее генератором (рис. 3,в). Характерной особенностью данного способа является небольшая глубина разгрузки турбины, а соответственно и котла при снижении вплоть до нуля выдаваемой с ТЭЦ электрической мощности. Эта маневренная технология заложена в проекты новой очереди Смоленской ТЭЦ-2 и Астраханской ТЭЦ с турбинами Т-110/120-130, третьего блока Т-180/210-130 Гомельской ТЭЦ-2 и др.

Усовершенствованная технология разгрузки паровой турбины ПГУ-450 МВт с использованием РОУ и штатных сетевых подогревателей применена в проекте строящейся Калининградской ТЭЦ-2. Результаты наших исследований и разработок применены также в совместно выполненных со странами-членами СЭВ работах по использованию в них действующих ТЭЦ в качестве маневренных электростанций.

Проблема прохождения минимальных электрических нагрузок в энергосистемах стран СНГ не утратила своей актуальности, и в этой связи данные исследования и разработки, а также опыт их практической апробации являются весьма полезными.

В пятой главе «Системы теплоснабжения с атомными источниками» представлены результаты исследований эффективности и возможности организации таких систем, что определялось началом широкого развития в 1980-х годах атомной энергетики. Только в течение 1981-1985 гг. намечалось ввести на АЭС 24-25 млн. кВт мощностей. Вместе с тем отставание в применении атомных ТЭЦ и станций теплоснабжения обуславливало возможное использование для теплоснабжения АЭС, что ускоряло и расширяло использование атомной теплофикации.

В этом направлении нами были исследованы:

- условия оптимального функционирования систем теплофикации при внедрении атомных энергетических установок (АЭУ) и критерии определения их сравнительной экономической эффективности;
- экономическая целесообразность и техническая возможность использования действующих и строящихся АЭС в качестве источников дальнего теплоснабжения;
- возможность и эффективность получения маневренной мощности на АТЭЦ за счет аккумулялирования теплоты и резервирования отборов;

- эффективность комбинированного производства электроэнергии, теплоты и дистиллированной воды на атомных водотепло-электроцентралях (АВТЭЦ);

- условия и параметры теплоснабжения от атомных котельных;

- перспектива дальнего транспорта теплоты от атомных источников с применением новых энергоносителей.

Анализ показывает, что нельзя рассматривать ввод АЭУ как обособленное действие. Их появление вызывает серьезные возмущения во всех звеньях ТЭК. Меняются функции и условия работы существующих источников; надежность и параметры теплоснабжения, структура топливного баланса и экологические (включая радиационную) нагрузки города; изменяются сроки вывода и обновления существующего оборудования ТЭЦ, котельных и тепловых сетей, так как становится существенным фактор их морального старения и уровень загрязнения окружающей среды; изменяется экономика энергоснабжающего комплекса в целом.

Все это учитывалось при разработке ВНИПИэнергопромом перспективных схем теплоснабжения городов, где рассматривались атомные источники теплоты (Минск, Москва, С.-Петербург, Киев, Одесса, Екатеринбург и др.), а также при технико-экономическом обосновании применения различных источников теплоты, в том числе и АЭС.

В связи со сложностью решаемых задач и необходимостью проведения комплексной оптимизации параметров системы теплоснабжения с АИТ была разработана экономико-математическая модель исследования, учитывающая технические, экономические, экологические и режимные параметры исследуемого объекта. Так, аналитическое выражение для определения предельного экономически допустимого расстояния транспорта теплоты от АЭС получено нами в виде функции ряда основных переменных (тепловой нагрузки, изменения мощности турбины, коэффициента теплофикации, температуры теплоносителя, диаметра и количества теплопроводов, длительности использования тепловой нагрузки, капиталовложений, затрат на энергоносители и экологию):

$$L_{\text{АЭС}} = f(Q_{\text{ст}}, Q_{\text{ст}}^{\text{год}}, \Delta N_{\text{АЭС}}^{0(\text{п})}, \alpha_{\text{АЭС}}, \alpha_{\text{АЭС}}^{\text{год}}, t_1^{\text{p(ср)}}, t_2^{\text{p(ср)}}, d_{\text{пр}}, d_{\text{обр}}, n_{\text{пр(обр)}}, \tau_{\text{оп}}, K_{\text{рк(пк)}}^{\text{уд}}, K_{\text{тп}}^{\text{уд}}, Z_{\text{от}}, Z_{\text{эз}}, \Delta Z_{\text{эк}}).$$

Исследования выполнены применительно к АЭС электрической мощностью 2 и 4 млн. кВт при их тепловой нагрузке соответственно 1160, 1750 и 3500 МВт и показали, что при расположении АЭС в 40-75 км от города теплоснабжение от нее экономичнее, чем теплоснабжение от котельных на газомазутном топливе и АСТ. При увеличении мощности системы теплоснабжения, повышении температуры теплоносителя в транзитном теплопроводе (до 170-200°C), а также переходе на открытую систему теплоснабжения при однострубно́м транспорте теплоты предельное рас-

стояние до потребителя может превышать 100 км. Существенно влияет на дальность транспорта теплоты от АЭС эколого-экономический фактор (вид замещаемого топлива котельных). Для систем теплоснабжения с подготовленной тепловой нагрузкой оптимальное значение часового коэффициента теплофикации $\alpha_{\text{АЭС}}$ равно 0,5-0,6, а для вновь создаваемых систем – 0,7-0,8. Возможные варианты приспособления турбин К-500-65/3000 в блоке с реактором для отпуска теплоты были проработаны совместно с ХТГЗ, ХФЦКБ Главэнергоремонта и Гидропроектом и использованы при разработке обосновывающих материалов по использованию действующих и новых АЭС (Балаковской, Курской, Калининской и др.) для теплоснабжения. Было рекомендовано в проекты новых станций или следующих очередей следует закладывать компоновочные и технические решения, позволяющие превращать АЭС в АТЭЦ, в том числе за счет установки теплофикационных турбин типа ТК-500.

В комплексе проблем энергообеспечения крупных промышленных городов острыми являются проблемы водообеспечения и очистки сточных вод. Проведенные нами совместно со специализированными организациями санитарно-гигиенические исследования по дистилляции и дополнительной обработке городских сточных вод открывают реальную возможность для практического применения атомных станций трехцелевого назначения – атомных водотеплоэлектроцентралей (АВТЭЦ), в которых теплофикационные агрегаты совмещены с дистилляционными установками, в результате чего одновременно производится электроэнергия, теплота и дистиллированная вода. При покрытии тепловых нагрузок города с миллионным населением за счет АВТЭЦ мощностью 4 млн. кВт можно осуществить дистилляцию всех сточных вод, что на 70% обеспечивает оборотное водопотребление города, и полностью покрыть его электропотребление. Теплофикационные отборы турбин оказываются максимально загруженными на протяжении года, что значительно увеличивает выработку электроэнергии на тепловом потреблении и обеспечивает высокие экономические показатели работы электростанции. За счет выработки дистиллята на тепловом потреблении отборов снижается в четыре раза расход теплоты на его получение (или почти вдвое его стоимость) по сравнению с производством дистиллята в отдельных опреснительных установках.

Выполнены исследования профиля АВТЭЦ по мощности, составу оборудования, технологической схеме и маневренным свойствам. Капиталовложения в АВТЭЦ меньше, чем в альтернативном варианте – АТЭЦ и традиционные очистные сооружения. Применение АВТЭЦ было рассмотрено для конкретных условий крупных городов бывшего СССР (Минск, Москва, С.-Петербург, Одесса и др.).

Исследования систем теплоснабжения с АК показали, что зона их конкурентоспособности находится в диапазоне тепловых нагрузок 600-1700 МВт, а экономичность и надежность повышается при их совместной

работе ($\alpha_{ак}^{год}=0,6-0,8$) с пиковыми котельными на органическом топливе, размещаемыми в зоне теплоснабжения. Расчетная температура прямой сетевой воды на АК может быть 170-180°C, что существенно снижает капиталовложения в транзитные тепловые магистрали, связывающие АК с пиковыми котельными. По радиационной безопасности и технико-экономическим параметрам на АК предпочтительны низкотемпературные реакторы с подземной интегральной (блочной) схемой компоновки. Проработки по АК использованы при разработке схем теплоснабжения ряда городов, в том числе Бреста, Витебска, Могилева.

Касаясь принципиально новых систем теплоснабжения, одной из перспективных представляем систему дальнего транспорта теплоты в химически связанном состоянии, технология которой основана на процессах паровой конверсии метана и его синтеза из окислов углерода и водорода. Нами совместно с НИКИЭТ и ГИАП были выполнены исследования по определению основных характеристик и экономичности такой системы. В зависимости от тепловой мощности конверсионного центра (принималась до 20 тыс. МДж /с) и метанаторных центров (принималась до 1100 МДж/с) и удельных капложений в них и газопроводы, а также альтернативных источников теплоснабжения (ТЭЦ, котельные на органическом топливе, АСТ) экономически оправданная дальность передачи энергии от теплового центра в химически связанном виде находится в пределах 100-200 км. Практическая же реализация такой системы требует выбора и комплексной оптимизации параметров технологических схем, а также создания необходимого оборудования всего энерготехнологического комплекса.

В шестой главе «Повышение надежности и экономичности систем транспорта теплоты» рассматривается комплекс теоретических и экспериментальных исследований и технических разработок по повышению эксплуатационного уровня и совершенствованию конструкций тепловых сетей. Осветим наиболее важные из них.

1. На основании обработки обширного материала по повреждаемости теплосетей (в зависимости от срока службы, диаметров, протяженности, условий прокладки, физического состояния, качества ремонтных работ и др.) была выведена зависимость удельной повреждаемости теплосетей от срока эксплуатации трубопроводов (рис.4) и суммарной повреждаемости трубопроводов на прогнозируемый период, описываемой уравнением

$$N^n = \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^4 L_{i,j}^n \cdot m_{I,j} + \sum_{i=7}^{15} \sum_{j=1}^4 L_{i,j}^n \cdot m_{II,j},$$

где $L_{i,j}^n$ – протяженность тепловых сетей различных диаметров i и сроков эксплуатации j на прогнозируемый год n ; $m_{I,j}$ и $m_{II,j}$ – удельная повреждаемость трубопроводов по группам I и II от срока эксплуатации j .

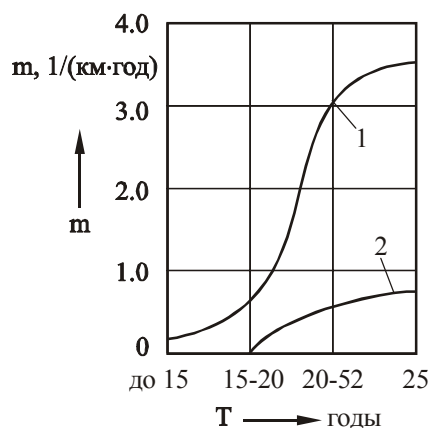


Рис. 4. Удельная повреждаемость теплопроводов различных сроков эксплуатации: 1 - диаметром Ду до 200 мм; 2 - Ду свыше 250 мм

В данном выражении i характеризует ряд из 15 наиболее характерных диаметров (от 50 до 1200 мм), а j – четыре срока эксплуатации теплопроводов: $j = 1$ – до 15 лет, $j = 2$ – 15...20 лет, $j = 3$ – 20...25 лет, $j = 4$ – свыше 25 лет. Значения $L_{i,j}^n$, $m_{I,j}$, $m_{II,j}$ представляются в виде матриц-векторов.

На основании разработанной модели был составлен прогноз повреждаемости теплопроводов г. Минска и других городов на перспективу до 15 лет, определены объемы их обновления для сдерживания и снижения повреждаемости

и предложены экономические критерии, определяющие необходимость проведения упреждающей замены изношенных сетей в конкретных условиях. Рекомендации используются предприятиями теплосетей Беларуси и России.

2. Впервые разработана методика выбора оптимальной толщины тепловой изоляции обычных теплопроводов с учетом изменения при эксплуатации ее теплофизических свойств, получившая применение во ВНИПИЭнергопроме. Выполняемые на ее основе многочисленные расчеты показывают, что при одинаковых условиях толщина изоляции подающего теплопровода оказывается в 1,3-1,5 раз больше, чем при расчете по Нормам потерь теплоты, а обратного, напротив, в 1,8-2 раза меньше, что дает значительную экономию материалов и затрат.

3. Для повышения надежности водяных тепловых сетей специально разработаны методика выбора физических и технических параметров естественной вентиляции подземных каналов теплосетей, а также технические решения и рекомендации по ее организации и режимам использования. Вентиляция теплосетей как простое, малозатратное, но достаточно эффективное средство сдерживания наружной коррозии теплопроводов получает широкое применение в теплосетях многих городов (Беларуси, России, Украины) и новым СНиП 2.04.07-86 «Тепловые сети» рекомендована к обязательному применению во всех канальных теплосетях.

4. На основе впервые разработанной методики, учитывающей экономическую и эксплуатационную специфику теплосетей, обоснована технико-экономическая целесообразность применения в теплосетях новой высокоэффективной конструкции теплопровода (теплогидропредызолированного), получившей на сегодня широкое применение в республике. Налажено индивидуальное производство ПИ-теплопроводов для различных видов прокладки.

5. Для разработки и внедрения новых энергоресурсосберегающих технических решений и технологий в системе транспорта теплоты необходимы были исследования, приближенные к реальным условиям, что требовало создания крупномасштабной экспериментальной модели тепловой сети. Для этого нами был разработан проект и сооружен на экспериментальной базе БелНИПИэнергопрома при районной котельной многофункциональный теплогидравлический стенд, который представляет собой натуральную модель теплосети с общей длиной наземных и подземных трубопроводов диаметром 125 мм около 1150 м, набором необходимых технических элементов и средств контроля и управления. На стенде осуществлялись разноплановые экспериментальные исследования, получившие практическое применение. Коснемся сути трех важных работ.

а) Рекомендованный ОРГРЭС для испытаний теплосетей на тепловые потери (с целью выявления физического состояния изоляции и нормирования потерь) типовой метод базируется на малых расходах теплоносителя, что требует значительного времени на проведение испытаний, приводит к большим погрешностям при наличии утечки теплоносителя и практически не позволяет испытывать магистрали больших диаметров и протяженностей. Нами был разработан теоретически, апробирован экспериментально и реально внедрен экспресс-метод испытания тепловых сетей на эксплуатационных расходах теплоносителя, признанный изобретением. Он получил широкое практическое применение и взят на вооружение наладочными и эксплуатационными предприятиями теплосетей России и Беларуси (включен в официальный руководящий документ).

б) Ненадежным и неэкономичным элементом наших теплосетей являются широко распространенные сальниковые компенсаторы, воспринимающие температурные линейные удлинения трубопроводов. В конце 1990-х годов получают применение более совершенные, но дорогие сильфонные компенсаторы. Чтобы избавиться от компенсаторов, Украинским институтом электросварки им. Е.О.Патона совместно с ВНИПИэнергопромом была создана и впервые применена в 1985-1987 гг. в Минских, Витебских и Ленинградских теплосетях принципиально новая конструкция труб с непрерывной по длине компенсацией температурных и других осевых деформаций трубопровода (СК-трубы), представляющая собой спиральношовную трубу, в стенке которой имеются предварительно сформированные на сворачиваемой полосе гофры, определенных высоты, ширины и наклона к оси трубы. За прошедшее время СК-трубопроводы диаметром 630 мм показали в работе хорошую компенсирующую способность и высокую надежность. Одновременно с накоплением эксплуатационных данных периодически проводились испытания модельных (на стенде) и натурных образцов с целью выявления изменения свойств металла и гидравлического сопротивления СК-труб, что позволило улучшить их характеристики. При незначительном удорожании изготовления СК-труб стои-

мость теплотрассы и эксплуатационные затраты при их применении оказываются на 20-25% ниже, чем в обычных канальных конструкциях. При бесканальной прокладке выигрыш еще больше.

в) Возможность значительного (до 50%) снижения гидравлического сопротивления трубопроводов теплосетей введением в поток жидкости специальных малых добавок веществ имеет несомненный интерес для крупных систем теплоснабжения с удаленными источниками теплоты. Такими добавками могут быть некоторые поверхностно-активные вещества, синтетические и природные высокомолекулярные полимеры, а также полисахариды, гидродинамические и теплофизические свойства которых исследованы совместно с ИТМО АН Беларуси. Эффект от применения активированного теплоносителя может проявляться в увеличении пропускной способности теплосетей, уменьшении диаметра труб, в увеличении дальности транспорта теплоносителя. Например, как показали расчеты, при активированном теплоносителе диаметр транзитных теплопроводов от загородной ТЭЦ тепловой мощностью 2000 МВт уменьшается с 1400 до 1000 мм, а экономически оправданная дальность транспорта теплоносителя в зависимости от передаваемой мощности доходит до 100 км.

Минимальная экономически обоснованная дальность передачи теплоты с использованием активированного водяного теплоносителя может быть найдена как, км:

$$L_{\min} = \frac{\Delta K \cdot \rho + g_{\text{п}} \cdot C_{\text{п}}}{\Delta \mathcal{E}_{\text{п}} \cdot c_3},$$

где ΔK – удельное удорожание единицы отпущенной теплоты за счет применения дозирочного устройства, а также увеличения поверхностей теплообмена (введение добавок может снижать коэффициент теплоотдачи) у источника и потребителя тепловой энергии, руб./ГДж; ρ – коэффициент, учитывающий эффективность использования капиталовложений, амортизационные отчисления и эксплуатационные расходы, 1/год; $g_{\text{п}}$ – удельный расход полимерных добавок на единицу отпущенной теплоты, кг/ГДж; $C_{\text{п}}$ – цена полимерной добавки, руб./кг; $\Delta \mathcal{E}_{\text{п}}$ – количество электроэнергии, сэкономленной при применении добавок, кВт·ч/(ГДж·км); c_3 – тариф на электроэнергию, руб./(кВт·ч).

Расчеты показывают, что периодическое (из-за термической и механической деградации) введение полимерных добавок увеличивает стоимость отпущенной единицы теплоты на 0,7-1%, но в то же время добавка позволяет экономить на перекачке теплоносителя 20% электроэнергии.

6. Проводимая в последние годы без надлежащих технико-экономических обоснований кампания экономии топлива в системах теплоснабжения за счет снижения против проектного графика 150/70°C температуры прямой сетевой воды в большинстве случаев не приводит к положительному топливному эффекту. При необходимости принятие опти-

мального температурного графика для конкретных систем теплоснабжения должно производиться с учетом технических, режимных, эксплуатационных и экономических факторов по минимуму суммарных затрат в виде функции

$$Z_T = f(Z_{T.C}, Z_{пер}, Z_{нас}, Z_{T.п}, Z_{п.з}, Z_{э.э}, Z_{с.в}),$$

где соответственно затраты: $Z_{T.C}$ – в тепловые сети (прокладка, наладка); $Z_{пер}$ – на перекачку теплоносителя; $Z_{нас}$ – в насосные станции; $Z_{T.п}$ – на тепловые потери в сетях; $Z_{п.з}$ – на перетопы зданий; $Z_{э.э}$ – на изменение выработки электроэнергии в энергосистеме; $Z_{с.в}$ – на изменение расхода топлива в связи с возвратом теплоты сетевой воде в насосах.

Разработанная нами методика позволяет рассчитать все составляющие затрат функции (13). Впервые выполненные на ее основе для ряда конкретных систем теплоснабжения оптимизационные расчеты температурных графиков показали следующее.

При теплоснабжении от ТЭЦ расчетная температура эксплуатационного графика прямой сети может быть в пределах $125 - 150^{\circ}\text{C}$ в зависимости от тепловой и гидравлической загрузки магистралей и дальности транспорта теплоты. Энергетически и экономически более выгодной в большинстве случаев, даже в недогружаемых системах теплоснабжения, является работа по проектному температурному графику $150/70^{\circ}\text{C}$, но с его срезкой в зоне отрицательных температур наружного воздуха, когда температура прямой сетевой воды достигает $120 - 130^{\circ}\text{C}$. Температура срезки определяется для каждой конкретной системы теплоснабжения. Главное, при этом обеспечивается стабильный гидравлический режим системы и не требуется переналадка сетей и абонентских узлов.

При теплоснабжении от котельной во всех случаях оптимальный эксплуатационный температурный график отпуска теплоты соответствует проектному $150/70^{\circ}\text{C}$, о чем свидетельствует график минимизируемой функции (13) по расходу топлива (рис. 5).

Переход на проектный температурный график в прямой сети ниже типового $150/70^{\circ}\text{C}$ при качественном регулировании отпуска теплоты от источника и общепринятом температурном графике работы систем отопления зданий $95/70^{\circ}\text{C}$, $105/70^{\circ}\text{C}$ пока не оправдывается. Необходима адаптация систем отопления зданий для работы с большим температурным перепадом, т.е. более низкой температурой обратной сетевой воды.

Срезка температурного графика в зоне положительных температур наружного воздуха как в отопительный, так в летний период соответствует температуре $65-70^{\circ}\text{C}$ из условий протяженности теплосетей, минимизации расходов сетевой и водопроводной воды, потерь теплоты со сли-

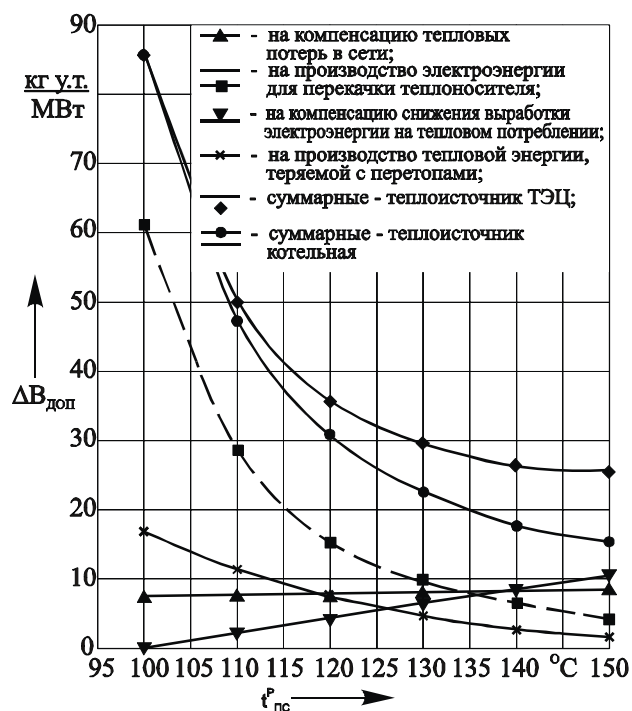


Рис. 5. Составляющие дополнительного удельного расхода топлива $\Delta V_{доп}$ на 1 МВт отпущенной теплоты в зависимости от температурного графика теплосети: тепловые потери в теплосетях при графике $150/70^{\circ}\text{C}$ - 5% от суммарного отпуска теплоты; удельные затраты электроэнергии на перекачку теплоносителя - $15(\text{кВт}\cdot\text{ч})/\text{МВт}$.

применением методических положений впервые разработанных нами для новых экономических условий.

Развитие малой теплофикации на базе турбинизации котельных началось в Беларуси (впервые в СНГ) в 1994 г., когда по нашей инициативе на ОАО «Калужский турбинный завод» (Россия) начали создаваться блочные паровые теплофикационные турбогенераторные установки мощностью 600 и 3500 кВт с производственным и отопительным противодавлением для конкретных объектов. Всего в республике уже эксплуатируется более 30 подобных турбоустановок.

Наряду с освоением малых паротурбинных установок выполнены исследования по обоснованию оптимального состава оборудования небольших теплофикационных парогазовых установок (ПГУ) исходя из уровня и характера тепловых нагрузок и режимов работы ПГУ в энергосистеме. Для выбора профиля паровой турбины в составе таких ПГУ разработана соответствующая методика. Показано, что наиболее полным и однозначным критерием системной эффективности теплофикационных ПГУ является получаемая за счет них относительная экономия топлива по отношению к отдельной схеме энергоснабжения, которая находится как

вом при недогреве воды, а также сдерживания коррозии канальных трубопроводов с минераловатной изоляцией.

В седьмой главе «Развитие теплоснабжения на базе малой теплофикации» рассматриваются технико-экономические аспекты и результаты решения этой проблемы. Как показали исследования, в рыночной экономике рентабельной во многих случаях является малая теплофикация (рис. 6) на базе теплоэлектроцентралей, имеющих 1-3 электрогенерирующие установки единичной мощностью 400...3500 кВт – мини-ТЭЦ (обычно на базе котельных) и 6...25 МВт – малые ТЭЦ).

Обоснование инвестиционной эффективности применения как большой, так и малой теплофикации может выполняться с

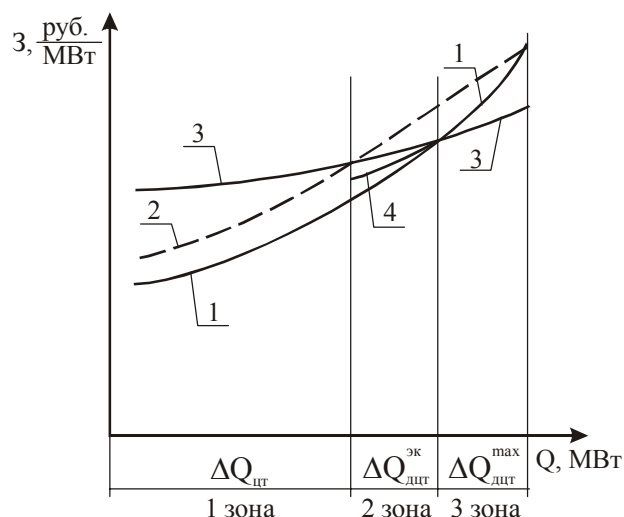


Рис. 6. Экономическое соотношение зон централизованного и децентрализованного теплоснабжения: 1 - экономическая характеристика ЦТ (Зцт); 2 - характеристика цены на теплоту в системе ЦТ (Цтэ); 3 - экономическая характеристика ДЦТ (Здцт); 4 - фактическая экономическая характеристика существующей системы ЦТ при переносе ее нагрузки на ДЦТ

$$\Delta \bar{B}_{\text{ЭК}} = \frac{N_{\text{ПГУ}}^{\text{H}} b_{\text{зам}} + Q_{\text{ПГУ}} b_{\text{кот}} - 1}{V_{\text{ПГУ}}},$$

где $N_{\text{ПГУ}}^{\text{H}}$, $Q_{\text{ПГУ}}$ — электрическая мощность «нетто» и отпуск теплоты от ПГУ; $V_{\text{ПГУ}}$ — расход топлива на ПГУ (при отсутствии дожига топлива расход его в камеру сгорания (КС) ГТУ); $b_{\text{зам}}$, $b_{\text{кот}}$ — удельный расход топлива на отпуск электроэнергии от замещающей КЭС энергосистемы и на отпуск теплоты от замещающей котельной.

Исследования, выполненные применительно к ПГУ мощностью 68 МВт (2хГТ-28+1хР-12+2КУ) Оршанской

ТЭЦ, показали, что значения $\Delta \bar{B}_{\text{ЭК}} = f(Q_{\text{ПГУ}})$ для частичных тепловых нагрузок ПГУ в случае отключения сетевого пучка (СП) оказываются выше, чем при его нахождении в работе, а предельно малая величина тепловой нагрузки, при которой $\Delta \bar{B}_{\text{ЭК}} = 0$, снижается примерно до 40%. В связи с этим обосновано, что при реальных тепловых нагрузках и существующем составе оборудования ПГУ ее целесообразно дооснастить низкопотенциальной паровой турбиной (НПТ) мощностью порядка 4,5 МВт, которая питается отработавшим паром давлением 0,6 МПа от противодавленческой турбины и имеет бойлер-конденсатор для возможной работы на сетевой воде (теплофикационный режим) и охлаждающей (конденсационный режим), что позволяет эффективно использовать ПГУ как в отопительный, так и летний периоды года даже при небольшой нагрузке горячего водоснабжения (~16 МВт) либо ее отсутствии. При этом КПД «брутто» ПГУ по выработке электроэнергии составляет 48-40%.

Заключение

В представленной диссертации обобщены результаты многолетней научно-исследовательской деятельности автора, направленной на решение крупной прикладной проблемы — повышение эффективности систем теплофикации и теплоснабжения. А именно:

1. Обобщены положительные и отрицательные стороны в развитии теплофикации на прошедших этапах, определены научно-технические предпосылки и экономические критерии ее применения в современных ус-

ловиях, заложенные в новые методические основы выбора вида систем теплоэлектроснабжения [2, 5–9, 88, 89].

2. Исследованы и выявлены условия эффективного использования теплофикационных турбин со ступенчатым подогревом сетевой воды в различных системах теплоснабжения и на их основе впервые разработан универсальный метод выбора оптимальных параметров отопительных отборов с учетом влияния режимных, климатических и конструктивных факторов. Доказано, что традиционное выполнение ступенчатого подогрева сетевой воды не обеспечивает максимально возможную выработку электроэнергии на тепловом потреблении, поэтому автором разработано принципиально новое высокоэффективное техническое решение – выполнение отопительных отборов в виде двухпоточных асимметричных цилиндров, которое реализовано в практике турбостроения и предполагается для применения при создании нового поколения отечественных турбин типа ТР, Т и ТК. Такой принцип организации теплофикационных отборов начал применяться в турбинах всех ведущих фирм Запада. Разработаны получившие широкое практическое применение структурные схемы и технические решения по переводу морально устаревших турбин типа Т, ПТ и К в теплофикационный режим со ступенчатым подогревом сетевой воды и использованию крупных конденсационных турбин КЭС в качестве теплофикационных [3, 10–14, 18–24, 89].

3. На основе системных исследований обоснована целесообразность создания базово-маневренных ТЭЦ, обеспечивающих экономичное и надежное энергоснабжение и регулирование электрических нагрузок энергосистем. Разработаны аналитические методы комплексной оптимизации параметров маневренного оборудования и теплоснабжения от таких ТЭЦ, которые, как выявлено, имеют существенное отличие от общепринятых стандартных параметров базовых ТЭЦ. Разработаны и внедрены различные технологические схемы работы в маневренных режимах блоков с турбинами Т-110/120-130, Т-180/210-130 (Минская ТЭЦ-4, Гомельская ТЭЦ-2, Смоленская ТЭЦ-2 и др.), апробированные в опытной эксплуатации [26–31, 33–47, 89].

4. Разработана экономико-математическая модель системы теплоснабжения с атомными источниками, и на ее основе исследованы возможные схемы модернизации турбин АЭС для отпуска теплоты, а также оптимальные параметры и условия применения систем дальнего теплоснабжения от конкретных АЭС. Разработана технологическая схема и исследованы профиль и параметры атомной станции трехцелевого назначения: водотеплоэлектроцентрали (АВТЭЦ), на которой, наряду с выработкой электроэнергии и теплоты, осуществляются дистилляция соленых вод или очистка городских сточных вод. АВТЭЦ имеет исключительно высокие энергетические, экономические и экологические показатели, что использовано при разработке перспективных схем теплоснабжения ряда городов. Иссле-

дованы условия применения в системах теплоснабжения атомных котельных. Выполнены исследования и показаны возможности систем дальнего транспорта теплоты (до 200 км) от энергоисточников в химически связанном состоянии. После аварии на ЧАЭС подход к применению атомной энергетики претерпел серьезные коррективы. Поэтому представленные в диссертации результаты исследований автора в области атомной теплофикации и теплоснабжения, надо полагать, будут способствовать и мотивировать создание в будущем систем теплоснабжения на основе более надежных и эффективных атомных энергоисточников [48–65, 89].

5. На основании обработки обширного практического материала создана математическая модель прогнозирования на 10–15 лет возможной коррозионной повреждаемости тепловых сетей подземной канальной конструкции с целью принятия мер по упреждению и сдерживанию их повреждаемости. Разработанные для этого технические решения применяются при реконструкции существующих и строительстве новых сетей. Впервые в мировой практике в Минских, Витебских и Ленинградских теплосетях внедрены и освоены самокомпенсирующиеся трубопроводы (СК-трубы), показавшие за 18 лет работы высокие эксплуатационные качества. Разработана методика и на ее основе исследована технико-экономическая эффективность различных типов теплопроводов исходя из их жизненного цикла, что определило применение в Беларуси высокоэффективных теплогидропредызолированных теплопроводов и создание заводов по их производству [69, 72, 75–80, 89].

6. Создан уникальный полупромышленный теплогидравлический стенд, моделирующий реальную тепловую сеть, с помощью которого широко исследованы гидродинамические и тепловые процессы сетей, в частности: отработаны новые методы защиты сетей от гидроударов и их испытаний на тепловые потери; исследовано влияние тепловлажностных условий на изменение теплофизических свойств минераловатной изоляции, в результате чего дана методика выбора термoeкономически оптимальной толщины изоляции подземных и надземных теплопроводов; исследована гидродинамика тепловой сети при работе на активированном специальными добавками водяном теплоносителе, что значительно снижает (до 50%) гидравлическое сопротивление сети, а соответственно затраты энергии на транспорт теплоносителя, и получит применение в крупных системах теплоснабжения с удаленными источниками теплоты [67, 68, 70–74, 87, 89].

7. Разработана новая методика, учитывающая системные, режимные и экономические факторы, на основе которой выполнены исследования и даны рекомендации по выбору оптимального проектного и эксплуатационного температурного графика систем теплоснабжения [89].

8. Методически и практически доказана целесообразность применения в нынешних условиях систем теплофикации на базе малых и мини-ТЭЦ

промышленного и коммунального назначения. Выявлены потенциальные возможности использования малых паротурбинных установок в котельных Беларуси и их мощностной ряд. Совместно с ОАО КТЗ (Россия) впервые созданы теплофикационные блочные паротурбинные установки мощностью от 0,6 до 3,5 МВт с начальным давлением 1,2 МПа и противодавлением 0,12-0,5 МПа, которые с 1996 г. устанавливаются и успешно эксплуатируются (более 30 шт.) в промышленно-отопительных котельных. С целью эффективного использования небольших парогазотурбинных установок (ПГУ) разработана методика выбора в их составе типа паровой турбины (Р, ТР, Т), исходя из тепловых нагрузок и режимов работы ПГУ. Ее применение апробировано на примере ПГУ-68 МВт Оршанской ТЭЦ, которую в существующих условиях рекомендовано дооснастить низкопотенциальной паровой турбиной мощностью 4,5 МВт с ухудшенным вакуумом (в бойлере-конденсаторе нагревается сетевая либо охлаждающая вода) [4–9, 82–86, 88, 89].

9. В целом практическое использование содержащихся в диссертации теоретических и технических разработок автора позволило сэкономить в Беларуси только за последнее десятилетие около 2,3 млн. т у.т. и способствует эффективному и надежному функционированию энергоснабжающего комплекса страны.

Опубликованные работы по теме диссертации

1. Леонков А.М., Яковлев Б.В. Тепловые электрические станции. – Минск: Выш. шк., 1978. – 232 с.
2. Методические основы исследования эффективности теплофикации в современных условиях/ Б.В. Яковлев, В.П. Бразовский, П.Н. Кнотько и др.// Проблемы промэнергетики и централизованного теплоснабжения: Сб. тр. ВЭП. – М., 1978. – №10. – С. 33-42.
3. Качан А.Д., Яковлев Б.В. Справочное пособие по технико-экономическим основам ТЭС. – Минск: Выш. шк., 1982. – 318 с.
4. Энергетическая программа Республики Беларусь на период до 2010 г.; Утв. Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 29.10.1992 № 654 / Соавтор Б.В. Яковлев. – Минск, 1992. – 116 с.
5. Энергетическая политика Республики Беларусь на перспективу до 2010 года / Соавтор Б.В. Яковлев // Минтопэнерго Республики Беларусь. – Минск, 1995. – 45 с.
6. Яковлев Б.В., Кнотько П.Н., Качан А.Д. Достижения и проблемы развития и функционирования теплофикации // Изв. вузов и энергетических объединений СНГ. Энергетика. – 2000. – №2. – С. 73-78.
7. Яковлев Б.В. Теплофикация. Транспорт теплоты. Белорусская энергетическая система (1988-2000) / Сост. И.Н. Александров и др. – Минск: ООО «Асар», 2001. – 440 с.
8. Яковлев Б.В. Теплофикация сегодня // Энергия и менеджмент. – 2003. – № 6. – С.15-19.
9. Кулебякин Л.Ю., Яковлев Б.В. Роль и задачи БелНИПИэнергопрома в повышении эффективности и развитии энергетики Беларуси // Электрические станции. – 2002. – № 3. – С. 2-8.

10. Яковлев Б.В. Эффективность ступенчатого подогрева сетевой воды у современных турбин // Известия высш. учеб. заведений. Энергетика. – 1969. – № 5. – С. 49 – 54.
11. Яковлев Б.В. Исследование выбора мест отопительных отборов пара у турбин со ступенчатым подогревом сетевой воды с учетом влияния различных факторов // Известия высш. учеб. заведений. Энергетика. – 1969. – № 8. – С. 61 – 66.
12. Исследование работы турбинных отсеков на переменных режимах / Н.П. Волков, А.М. Леонков, Б.В. Яковлев и др. // Известия высш. учеб. заведений. Энергетика. – 1969. – № 7. – С. 45 – 51.
13. Яковлев Б.В., Качан А.Д. Перевод конденсационных турбин на теплофикационное противодавление // Промышленная энергетика. – 1969. – № 10. – С. 51 – 53.
14. А.с. 250161 СССР. Теплофикационная турбина с отборами для ступенчатого подогрева воды / Б.В. Яковлев // Бюл. изображений. – 1969. – № 26.
15. Леонков А.М., Яковлев Б.В. Возможности повышения эффективности использования и совершенствования теплофикационных турбоустановок с отопительными отборами пара // Изв. высш. учеб. заведений. Энергетика. – 1970. – № 12. – С. 43 – 49.
16. Яковлев Б.В. Исследование влияния режимов ступенчатого подогрева сетевой воды на выбор оптимальных поверхностей нагрева сетевых подогревателей турбин // Теплоэнергетика. Вып. 3. – Минск, 1973.
17. Справочное пособие теплоэнергетика электрических станций / Под ред. А.М. Леонкова, Б.В. Яковлева. – Минск: Беларусь, 1974. – 368 с.
18. Яковлев Б.В., Кузнецов Л.В. Выбор профиля турбин мощностных ТЭЦ при работе в высокотемпературных системах теплоснабжения // Научные и прикладные проблемы энергетики. Вып. 4. – Минск: Высш. шк., 1977. – С. 10 – 13.
19. Методика выбора оптимальных расчетных характеристик турбин типа ТК для АТЭЦ / А.Д. Качан, А.М. Леонков, В.М. Сыропушинский, Б.В. Яковлев // Научные и прикладные проблемы энергетики. Вып. 6. – Минск: Высш. шк., 1979. – С. 12 – 16.
20. Яковлев Б.В. К выбору оптимальных параметров отопительных отборов в турбинах со ступенчатым подогревом сетевой воды // Известия высш. учеб. заведений. Энергетика. – 2002. – № 2. – С. 60 – 68.
21. Яковлев Б.В. Высокоэффективные теплофикационные паровые турбины со ступенчатым подогревом сетевой воды // Известия высш. учеб. заведений. Энергетика. – 2002. – № 4. – С. 57 – 70.
22. Выбор оптимального варианта модернизации турбин типа К-25-90 и К-50-90 при переводе их в теплофикационный режим работы / Н.П. Волков, А.М. Леонков, А.Д. Качан, Б.В. Яковлев // Известия высш. учеб. заведений. Энергетика. – 1967. – № 12. – С. 56 – 61.
23. Яковлев Б.В., Бразовский В.П. Эффективность использования КЭС для дальнего теплоснабжения // Техничко-экономическая оптимизация ТЭС. – Саратов, 1977. – С. 38 – 40.
24. Яковлев Б.В., Качан А.Д. Приоритетность перевода в режим теплофикационного противодавления турбин ТЭЦ высокого давления // Известия высш. учеб. заведений. Энергетика. – 2001. – № 6. – С. 66 – 74.
25. Кнотько П.Н., Ровек И.И., Яковлев Б.В. Технические решения использования ТЭЦ в маневренных режимах // Перспективы развития систем централизованного теплоснабжения в СССР: Сб. тр. ВЭП. – М., 1981. – С. 100 – 105.
26. Кнотько П.Н., Трутаев В.И., Яковлев Б.В. Эффективность развития теплофикации на основе базово-маневренных ТЭЦ // Известия высш. учеб. заведений. Энергетика. – 1982. – № 6. – С. 40 – 45.

27. Проектные исследования работы ТЭЦ в маневренном режиме / П.Н. Кнотько, И.И. Ровек, А.В. Щербина, Б.В. Яковлев // Электрические станции. – 1982. – № 5. – С. 17 – 20.
28. Оптимальные параметры пара базово-маневренных ТЭЦ / Б.В. Яковлев, П.Н. Кнотько, В.П. Никитин и др. // Известия высш. учеб. заведений. Энергетика. – 1982. – № 9. – С. 58 – 63.
29. Исследование масштабов и эффективности использования ТЭЦ в качестве маневренной мощности и исходные требования на реконструкцию блоков / П.Н. Кнотько, В.И. Трутаев, А.В. Щербина, Б.В. Яковлев // Вопросы повышения маневренности ТЭС и АЭС: Сб. докладов всесоюзн. совещания. – Горловка, 1982. – С. 23 – 26.
30. А.с. 1044068 СССР. Способ разгрузки теплофикационной энергетической установки с промежуточным перегревом пара / П.Н. Кнотько, И.И. Ровек, Б.В. Яковлев и др. // Бюл. изобр. – 1983.
31. Комплексная оптимизация низкотемпературных поверхностей нагрева маневренных котлов ТЭЦ / Г.В. Антропов, Б.В. Яковлев, А.В. Васильев и др. // Известия высш. учеб. заведений. Энергетика. – 1984. – № 8. – С. 76 – 81.
32. Использование действующих ТЭЦ в качестве маневренных электростанций в Европейских странах – членах СЭВ / А.П. Борушко, П.Н. Кнотько, В.И. Трутаев, Б.В. Яковлев // Информационный бюл. по электроэнергии СЭВ. – М., 1984. – № 23. – С. 25-27.
33. Перспективы работы ТЭЦ в маневренном режиме и требования к их проектированию и эксплуатации / П.Н. Кнотько, В.М. Сыропушинский, Б.В. Яковлев и др. // Повышение надежности и маневренности энергетического оборудования ТЭС, работающих на непроектном и ухудшенного качества топливе: Тез. докл. совещания. – Львов, 1984. – С. 7 – 8.
34. А.с. 1151695 СССР. Комбинированная энергетическая установка / А.Т. Глюза, Б.В. Яковлев, М.Е. Воронков и др. // Бюл. изобр. – 1985. – № 15.
35. Определение оптимального коэффициента теплофикации маневренных ТЭЦ / Б.В. Яковлев, П.Н. Кнотько, Ю.М. Хлебалин и др. // Системы централизованного теплоснабжения: Сб. тр. ВЭП. – М., 1985. – С. 16 – 23.
36. Оптимальные начальные параметры пара маневренных ТЭЦ / Б.В. Яковлев, П.Н. Кнотько, Никитин В.П. и др. // Системы централизованного теплоснабжения: Сб. тр. ВЭП. – М., 1985. – С. 5 – 15.
37. Исследование тепловой схемы маневренного теплофикационного энергоблока с турбиной Т-180/210-130 / В.М. Сыропушинский, А.А. Ганжин, Б.В. Яковлев и др. // Электрические станции. – 1986. – № 3. – С. 27 – 29.
38. А.с. 1298409 СССР. Способ работы теплоэлектроцентрали в маневренном режиме / П.Н. Кнотько, Б.В. Яковлев, А.В. Щербина и др. // Бюл. изобр. – 1987. – № 11.
39. Яковлев Б.В., Глюза А.Т., Шиенок О.Ф. Оценка маневренных возможностей ТЭЦ при аккумулировании теплоты в транзитных тепловых сетях // Роль энергоисточников в покрытии переменной части графиков электрических нагрузок энергосистем: Сб. тр. ВЭП. – М., 1987. – С. 93 – 107.
40. Оптимальные параметры теплоснабжения от ТЭС с принудительной разгрузкой / Б.В. Яковлев, А.Н. Чертыков., Л.В. Кузнецов и др. // Известия высш. учеб. заведений. Энергетика. – 1987. – № 1. – С. 54 – 57.
41. А.с. 1364751 СССР. Теплофикационная энергетическая установка / А.И. Андрищенко, Ю.М. Хлебалин, Б.В. Яковлев и др. // Бюл. изобр. 1988. – № 1.

42. Трутаев В.И., Яковлев Б.В., Рузанков В.Н. К вопросу экономического стимулирования маневренных режимов работы электростанций и энергосистем // Электрические станции. – 1988. – № 5. – С. 8 – 10.
43. Обоснование унифицированной поверхности конденсатора маневренных теплофикационных турбин/ Б.В. Яковлев, Т.И. Попова, О.В. Гончаренко и др. // Известия высш. учеб. заведений. Энергетика. – 1988. – №11. – С. 94 – 96.
44. Опыт проектирования маневренных отопительных ТЭЦ с электродкотлами / В.М. Сыропушинский, Б.В. Яковлев, Н.М. Рудерман и др. // Научно-технические задачи развития теплоснабжения в СССР: Сб. тр. ВЭП. – М., 1989. – С. 50 – 63.
45. А.с. 159526 СССР. Способ работы теплофикационной паротурбинной установки/ В.М. Сыропушинский, Н.М. Сытникова, А.В. Щербина, Б.В. Яковлев // Бюл. изобр. – 1990. – № 34.
46. А.с. SU 1774032 A1. Теплофикационная паротурбинная энергетическая установка/ В.М. Сыропушинский, Н.Н. Киселева, Б.В.Яковлев и др. // Бюл. изобр. – 1992. – № 41.
47. А.с. SU 1815342 A1. Способ разгрузки теплофикационной энергетической установки/ В.М. Сыропушинский, Т.М. Сыропушинская, Б.В. Яковлев и др. // Бюл. изобр. – 1993. – № 18.
48. Бразовский В.П., Минков В.А., Яковлев Б.В. Оптимальное функционирование систем теплофикации в условиях внедрения атомных энергетических установок // Известия АН БССР. Серия физико-энергетических наук. – 1978. – № 1. – С. 11 – 17.
49. Проблемы использования атомных котельных для теплоснабжения / Б.В. Яковлев, П.Н. Кнотько, Б.Д. Чарушников и др. // Известия АН БССР. Серия физико-энергетических наук. – 1978. – № 1. – С. 5 – 10.
50. Трутаев В.И., Яковлев Б.В. К вопросу методики определения сравнительной экономической эффективности атомных источников тепла // Известия АН БССР. Серия физико-энергетических наук. – 1978. – № 2. – С. 14 – 18.
51. А.с. 811712 СССР. Способ очистки сточных вод / Е.П. Петряев, А.М. Ковалевская, Б.В. Яковлев и др. // Бюл. изобр. – 1980.
52. Проблемы формирования комплексных систем энерговодоснабжения городов на базе АВТЭЦ / П.Н. Кнотько, М.Н. Панкратов, А.Я. Простак, Б.В. Яковлев // Развитие централизованного теплоснабжения на базе ядерных энергоисточников: Сб. тр. ВЭП. – М., 1980. – С. 45 – 50.
53. Использование ионизирующего излучения в подготовке сточных вод для подпитки теплоохлаждающих систем тепловых станций / Е.П. Петряев, Б.В. Яковлев, А.М. Ковалевская и др. // Известия высш. учеб. заведений. Энергетика. – 1981. – № 3. – С. 57 – 62.
54. Яковлев Б.В., Бразовский В.П. Исследование условий использования АЭС в крупных системах централизованного теплоснабжения // Научные и прикладные проблемы энергетики. Вып. 8. – Минск: Выш. шк., 1981, – С. 3 – 12.
55. Радиационная обработка городских сточных вод для использования в оборотных системах водоснабжения ТЭЦ / Е.П. Петряев, А.М. Ковалевская, Б.В. Яковлев, В.И.Козлова // Теплоэнергетика. – 1981. – № 11. – С. 63.
56. А.с. 845385. Способ очистки сточных вод / Е.П. Петряев, А.М. Ковалевская, Б.В. Яковлев и др. // Бюл. изобр. – 1981.
57. Техничко-экономическая модель системы централизованного теплоснабжения на базе АЭС / Б.В. Яковлев, А.Т. Глюза, Э.П. Минич и др. // Известия высш. учеб. заведений. Энергетика. – 1982. – № 12. – С. 91 – 95.

58. Системы атомного теплоснабжения с дальним транспортом теплоты в химически связанном виде / Я.А. Ковылянский, И.А. Смирнов, Б.В. Яковлев и др. // Системы теплоснабжения с нетрадиционными источниками тепла: Сб. тр. ВЭП. – М., 1982. – С. 96 – 106.
59. Яковлев Б.В. Системы энергоснабжения будущего // Энергоэффективность. – 2003. – № 7. – С. 10 – 11.
60. Яковлев Б.В., Глюза А.Т., Сыропушинский В.М. Эффективность использования АЭС как источников дальнего теплоснабжения // Известия высш. учеб. заведений. Энергетика. – 1983. – № 4. – С. 79 – 81.
61. Атомная маневренная АТЭЦ малой мощности с аккумуляторами тепла / М.Е. Воронков, А.Т. Глюза, Б.В. Яковлев и др. // Атомная энергия. – 1983. – Т. 55. – С. 19 – 22.
62. Стерман Л.С., Кожеватов В.Ф., Яковлев Б.В. Выбор схемы и числа ступеней опреснительной установки для АТЭЦ // Известия высш. учеб. заведений. Энергетика. – 1983. – № 9. – С. 53 – 58.
63. Яковлев Б.В., Глюза А.Т. Аналитическая методика определения предельного экономически допустимого расстояния теплоснабжения от АЭС // Научные и прикладные проблемы энергетики. Вып. 10. – Минск: Выш. шк., 1983, – С. 43 – 48.
64. Яковлев Б.В., Глюза А.Т., Простак А.Я. Роль АВТЭЦ в энергетическом комплексе страны // Атомные системы теплоснабжения: Сб. тр. ВЭП. – М., 1984. – С. 170 – 188.
65. Бразовский В.П., Яковлев Б.В., Авербах Ю.А. АЭС – потенциальные источники дальнего теплоснабжения // Системы централизованного теплоснабжения: Сб. тр. ВЭП. – М., 1985. – С. 46 – 53.
66. Тепловые и атомные электрические станции / Под ред. А.М. Леонкова, А.Д. Качана; Соавтор Б.В. Яковлев. – Минск: Выш. шк., 1991. – 336 с.
67. Шавельзон М.И., Яковлев Б.В. Влияние тепловлажностных условий на выбор толщины изоляции подземных теплопроводов // Системы централизованного теплоснабжения: Сб. тр. ВЭП. – М., 1986. – С. 48 – 57.
68. А.с. 1288452 СССР. Способ испытания тепловых сетей на тепловые потери / М.И. Шавельзон, Б.В. Яковлев, Л.Н. Гольдберг // Бюл. изобр. – 1987. – № 5.
69. Опыт проектирования и эксплуатации теплотрассы из самокомпенсирующихся труб в г. Минске / В.В. Болкунец, В.В. Белявский, Б.В. Яковлев и др. // Энергетика и электрификация (Экспресс-информация. Серия: Сооружение ТЭС). Вып. 5. – 1988. – С. 1 – 8.
70. Яковлев Б.В., Левин М.Л., Трутаев В.И. Влияние полимерных добавок на технико-экономические характеристики транспорта тепла // Задачи технического перевооружения, реконструкции и модернизации систем ЦТ: Сб. тр. ВЭП. – М., 1988. – С. 120 – 141.
71. Снижение гидравлических потерь теплопроводов при введении полимерных добавок / Б.В. Яковлев, М.Л. Левин, В.В. Кулебякин и др. // Научно-технические задачи развития теплоснабжения в СССР: Сб. тр. ВЭП. – М., 1989. – С. 149 – 174.
72. Прогнозирование повреждаемости подземных тепловых сетей / А.Т. Глюза, Б.В. Яковлев, Ю.Д. Лысенко и др. // Теплоэнергетика. – 1989. – № 6. – С. 18 – 21.
73. Стенд для исследования гидродинамики и теплообмена в теплоносителях с добавками, снижающими трение / В.В. Кулебякин, Б.В. Яковлев, С.М. Власенко и др. // Научно-технические задачи развития теплоснабжения в СССР: Сб. тр. ВЭП. – М., 1989. – С. 175 – 183.
74. Яковлев Б.В., Харечкин В.В. Экспресс-метод испытаний водяных тепловых сетей на тепловые потери. – Минск: БелНИПИэнергопром, 1992. – 50 с.

75. Яковлев Б.В., Болкунец В.В., Харечкин В.В. Актуальные проблемы повышения надежности и экономичности транспорта теплоты в системах централизованного теплоснабжения // Сб. тр. БелНИПИЭП. – Минск, 1996. – С. 69 – 84.
76. Эффективность применения теплопроводов различного типа / Б.В. Яковлев, Л.Ю. Кулебякин, В.И. Трутаев, В.В. Харечкин // Сб. тр. БелНИПИЭП. – Минск, 1996. – С. 85 – 94.
77. Проектирование и строительство тепловых сетей из теплогидропредизолированных труб: Пособие П1-98 к СНиП 2.04.07-86 / Б.В. Яковлев, С.Ф. Кнырович, Ю.Б. Яковлев, В.В. Белявский. – Минск: Минархстрой Республики Беларусь, 1999. – 49 с.
78. Влияние эксплуатационных факторов на малоцикловую прочность самокомпенсирующихся трубопроводов/ П.С. Юхимец, Б.В. Яковлев, А.П. Гусенков, Г.В. Москвитин // Изв. вузов и энергетических объединений СНГ. Энергетика. – 2001. – № 4. – С. 67 – 72.
79. Юхимец П.С., Яковлев Б.В. Предварительное напряжение самокомпенсирующегося трубопровода и оценка его влияния на эксплуатационный ресурс // Изв. вузов и энергетических объединений СНГ. Энергетика. – 2004. - № 1. – С. 40 – 45.
80. Яковлев Б.В. Предотвращение коррозионной повреждаемости тепловых сетей// Энергоэффективность. – 2002. – № 4. – С.9 – 10.
81. Ровек И.И., Трутаев В.И., Яковлев Б.В. Исследование экономической эффективности дальнейшего использования ТЭЦ с оборудованием среднего давления в системах теплоснабжения // Перспективы развития систем централизованного теплоснабжения в СССР: Сб. тр. ВЭП. – М., 1981. – С. 21 – 28.
82. Родзевич В.А., Яковлев Б.В., Пекелис В.Г. Малая тепловая энергетика – эффективный путь централизованного энергоснабжения // Проблемы энергоресурсосбережения – новые решения: Тезисы докл. Международного семинара на базе 1-й Международной выставки "Энергоресурсосбережение 95". – Минск, 1995. – С. 7 – 9.
83. Яковлев Б.В. Развитие тепловой энергетики Беларуси на базе малых и мини-ТЭЦ// Сб. тр. БелНИПИЭП. – Минск, 1996. – С. 116-122.
84. Яковлев Б.В., Колядич Е.Л., Бондаренко Г.А. Опыт создания оборудования и проектирования малых паротурбинных ТЭЦ // Сб. тр. БелНИПИЭП. – Минск, 1996. – С. 123 – 131.
85. Яковлев Б.В. О применении ГДГ в котельных // Энергия и менеджмент. – 2003. – № 5. – С. 4 – 7.
86. Методические основы выбора типа паровой турбины для теплофикационных ПГУ утилизационного типа средней мощности/ Б.В. Яковлев, Н.В. Левшин, Н.Г. Чапайкина, С.А. Качан // Изв. вузов и энергетических объединений СНГ. Энергетика. – 2001. – №5. – С. 58 – 64.
87. Яковлев Б.В. Теплофикация и тепловые сети. – Минск: УВИЦ при УП «Белэнергосбережение», 2003. – 126 с.
88. Яковлев Б.В. Технико-экономическое обоснование выбора вида систем теплоснабжения в современных условиях // Энергия и менеджмент. – 2004. – № 4. – С. 14 – 20.
89. Яковлев Б.В. Повышение эффективности систем теплофикации и теплоснабжения. Минск: Адукацыя і выхаванне, 2002. – 448 с.

Р Э З Ю М Е

Якаўлеў Барыс Уладзіміравіч

Павелічэнне эфектыўнасці сістэм цеплафікацыі і цеплазабеспячэння

Ключавыя словы: эканамічныя крытэрыі, цеплафікацыйная турбіна, ацяпляльныя адборы, базава-манеўраная ЦЭЦ, атамныя энергакрыніцы, водацеплацэнтраль, сістэма цеплазабеспячэння, хімічна звязаны энерганосьбіт, акумуляванне цеплаты, тэмпературны графік цепласеткі, цеплавая сеткі, цеплагідрапрадзіяляваныя цеплаправоды, самакампенсаваныя цеплаправоды, малыя энергаўстаноўкі.

Аб'ект даследавання: эканоміка ПЭК, цеплавая электрастанцыі і сістэмы транспарту цеплаты.

Прадмет даследавання: цеплафікацыйныя турбаўстаноўкі і вадзяныя цеплавая сеткі.

Метад даследавання – разлікова-аналітычны і эксперыментальны, матэматычнае мадэліраванне.

Мэта працы – стварэнне новых тэарэтычных і практычных засноў, якія садзейнічаюць павышэнню эфектыўнасці функцыянавання сістэм цеплафікацыі і цеплазабеспячэння.

Атрыманы наступныя найбольш істотныя вынікі.

Прапанавана адаптаваная да рынкавай эканомікі новая методдыка выбару сістэм цэнтралізаванага і дэцэнтралізаванага цеплазабеспячэння. Створана найбольш эфектыўная ў сусветнай практыцы цеплафікацыйная турбаўстаноўка з незалежнымі адборамі для ступеньчатага падагравання сеткавай вады і прапанаваны тэхнічныя рашэнні па павышэнню эканамічнасці турбін, якія дзейнічаюць. Абгрунтавана мэтазгоднасць стварэння базава-манеўраных ЦЭЦ у энергасістэмах, распрацаваны іх тэхналагічныя схемы, даследаваны і прапанаваны аптымальныя параметры і профіль асноўнага абсталявання. Выяўлены аптымальныя параметры і тэхнічныя рашэнні сістэм энергазабеспячэння з атамнымі энергакрыніцамі (КЭС, АВЦЭЦ, АСЦ). Распрацаваны новыя тэарэтычныя асновы, тэхнічныя і тэхналагічныя рашэнні, якія забяспечваюць высокую надзейнасць і эканамічнасць вадзяных цеплавых сетак, а таксама эксплуатацыйныя метады цеплавой і трываласнай іх дыягностыкі. Распрацавана больш дасканалая методдыка выбару аптымальнага тэмпературнага графіка сістэм цеплазабеспячэння. Выяўлены профіль і падрыхтаваны тэхнічныя прапановы, на падставе якіх АТ КТЗ (Расія) створаны малыя блочныя паратурбінныя энергаўстаноўкі магутнасцю ад 600 да 3500 кВт для міні-ЦЭЦ і кацельняй.

Вынікі працы атрымалі шырокае практычнае выкарыстанне. Большасць распрацаваных і ўкаранёных тэхнічных рашэнняў прызнана вынаходніцтвамі.

РЕЗЮМЕ

Яковлев Борис Владимирович

Повышение эффективности систем теплофикации и теплоснабжения

Ключевые слова: экономические критерии, теплофикационная турбина, отопительные отборы, базово-маневренная ТЭЦ, атомные энергоисточники, водотеплоэлектроцентраль, система теплоснабжения, химически связанный энергоноситель, аккумулялирование теплоты, температурный график теплосети, тепловые сети, теплогидропредызолированные и самокомпенсирующиеся теплопроводы, малые энергоустановки.

Объект исследования: экономика ТЭК, тепловые электростанции и системы транспорта теплоты.

Предмет исследования: теплофикационные турбоустановки и водяные тепловые сети

Метод исследования: математическое моделирование, расчетно-аналитический и экспериментальный.

Цель работы: создание новых теоретических и практических основ, способствующих повышению эффективности функционирования систем теплофикации и теплоснабжения.

Получены следующие наиболее существенные результаты.

Предложена адаптированная к рыночной экономике новая методика выбора систем централизованного и децентрализованного теплоснабжения. Создана более эффективная в мировой практике теплофикационная турбоустановка с независимыми отборами для ступенчатого подогрева сетевой воды и предложены технические решения по повышению экономичности действующих турбин. Обоснована целесообразность создания базово-маневренных ТЭЦ в энергосистемах, разработаны их технологические схемы, исследованы и предложены оптимальные параметры и профиль основного оборудования. Выявлены оптимальные параметры и технические решения систем энергоснабжения с атомными источниками (КЭС, АВТЭЦ, АСТ). Разработаны новые теоретические основы, технические и технологические решения, обеспечивающие высокую надежность и экономичность водяных тепловых сетей, а также эксплуатационные методы тепловой и прочностной их диагностики. Разработана более совершенная методика выбора оптимального температурного графика систем теплоснабжения. Выявлен профиль и подготовлены технические предложения, на основе которых на АО КТЗ (Россия) созданы малые блочные паротурбинные энергоустановки мощностью от 600 до 3500 кВт для мини-ТЭЦ и котельных.

Результаты работы получили широкое практическое применение. Большинство разработанных и внедренных технических решений признано изобретениями.

SUMMARY

Yakovlev Boris Vladimirovich

Upgrading of the effectiveness of the power-and-heat generation and heat-supply systems

Key words: economic criteria, heat-extraction turbine, heat extractions, base-load cycling combined heat plants (chp), nuclear power sources, water combined heat plant, heat-supply system, chemically combined power carrier-agent, thermal accumulation, temperature schedule of heating system, heating system, thermally and hydraulically preinsulated and self-compensated heat-pipelines, small generating units.

Object of research: economics of heat-and-power engineering complex, thermoelectric power stations, thermal transportation systems.

Subject of research: dual-purpose turbine plant and water heating systems.

Method of research: mathematical modelling, calculating, analytical and experimental.

Purpose of research: creation of new theoretical and practical foundations, allowing to increase effectiveness of heat-extraction and heat-supply systems functioning.

The most significant results are as follows.

The new principles of centralized and decentralized heat-supply systems selection, adopted to market economy, were proposed. The more effective in the world practice heat-extraction turboset with independent extractions for the staged heat-up of the system water was created and the engineering conceptions regarding the efficiency upgrading of the operating turbines were suggested. The advisability of the creation of the base-load cycling CHPs in the power systems was substantiated, their process diagrams were designed and the optimal parameters and the profile of the main equipment were suggested. The optimal parameters and engineering conception of the power supply systems including chemothermal systems with nuclear water CHPs and heat-supply nuclear power plants were revealed. The new theoretical principles, technical and technological conceptions ensuring the high reliability and economy of the water heat networks as well as the maintenance procedures of their thermal and strengthening diagnostics. New, more perfect method of optimal temperature schedule of heat-supply systems' selection was elaborated. The small unit (modular) steam turbine power sets with power 600-3500 kilowatt were created at the Joint-Stock Company KTZ (Russia) on the base of the revealed profile and the prepared engineering conceptions.

The results of research have got wide practical implementation. Most designed and implemented technical solutions were acknowledged as inventions.

The results of the author's theoretical investigations was acquired an extensive practical application. A great number of the author's engineering conceptions that was elaborated and introduced are approved by the patents.

Научное издание

ЯКОВЛЕВ Борис Владимирович

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ
ТЕПЛОФИКАЦИИ И ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

05.14.14 – Тепловые электрические станции, их энергетические системы
и агрегаты

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Редактор Т.Н. Микулик

Подписано в печать 30.06.2004.

Формат 60×80/16. Бумага типографская № 2.

Печать офсетная. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. 2,3. Уч.–изд. л. 1,8. Тираж 100. Заказ 597.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Белорусский национальный технический университет.
Лицензия № 02330/0056957 от 01.04.2004.
220013, Минск, проспект Ф.Скорины, 65.