

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 621.311.22:697.34:005.93 (476)

БОБИЧ

Александр Александрович

**КОМПЛЕКС ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ МЕРОПРИЯТИЙ НА ТЭЦ
ПРИ АДАПТАЦИИ К УСЛОВИЯМ РАБОТЫ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ
С ВВОДОМ БЕЛОРУССКОЙ АЭС**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.14.14 – Тепловые электрические станции,
их энергетические системы и агрегаты

Минск 2018

Научная работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете

Научный руководитель

РОМАНЮК Владимир Никанорович,
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Промышленная теплоэнергетика и теплотехника» Белорусского национального технического университета

Официальные
оппоненты:

КАРНИЦКИЙ Николай Борисович,
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Тепловые электрические станции»;

МОЛОЧКО Фёдор Иванович,
кандидат технических наук, главный специалист отдела общей энергетики Научно-исследовательского и проектного республиканского унитарного предприятия «БЕЛТЭИ» (РУП «БЕЛТЭИ»)

Оппонирующая
организация

Проектное научно-исследовательское республиканское унитарное предприятие «Белнипиэнергопром» (РУП «Белнипиэнергопром»)

Защита состоится 13 апреля 2018 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.01 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, пр-т Независимости, 65, корп. 2, ауд. 201, телефон ученого секретаря (017) 293-92-16, e-mail: pte@bntu.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан 12 марта 2018 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций,
кандидат технических наук



Д.Б. Муслина

© Бобич А. А., 2018

© Белорусский национальный
технический университет, 2018

ВВЕДЕНИЕ

Доля импортируемого природного газа (ПГ), являющегося основным видом топлива в приходной части энергобаланса Республики Беларусь, достигает 59 %, в объединенной энергетической системе (ОЭС) – 96 %. В соответствии с индикатором энергетической безопасности удельный вес ПГ в приходной части энергобаланса страны необходимо снизить до 50 %. Снижение доли ПГ в приходной части энергобаланса страны, как правило, связано с повышением эффективности использования ПГ путем модернизации тепловых электростанций (ТЭС) и внедрением парогазовых установок на теплоэлектроцентралях (ТЭЦ), а также вводом атомной электростанции (АЭС). С вводом Белорусской АЭС изменится структура генерации электрической энергии (ЭЭ) и тепловой энергии (ТЭ) при неизменной структуре их потребления, при этом в ОЭС ожидаются системные проблемы надежной эксплуатации, обеспечения графика электрических нагрузок и «вращающегося» резерва мощности, которые приведут к перерасходу топлива в стране, поэтому необходимы комплексные решения, учитывающие особенности ОЭС и конкретных ТЭЦ и требуется разработка энергосберегающих мероприятий на ТЭЦ, развитие и внедрение которых сдерживается отсутствием: исследований по применению методов оценки энергетической эффективности ТЭЦ и ОЭС; количественной оценки применения типов тепловых насосов для утилизации низкотемпературных тепловых потоков; комплекса энергосберегающих мероприятий направленных на модернизацию тепловых схем ТЭЦ энергосистемы Беларуси, способствующих повышению их эффективности после ввода Белорусской АЭС.

Анализ отечественных и зарубежных литературных источников показал, что применение известных способов регулирования графика генерации ЭЭ и мероприятий по повышению эффективности ТЭЦ для условий ОЭС Беларуси после ввода Белорусской АЭС (использование электродухов на ТЭЦ и котельных, дифференцированного по зонам суток тарифа на ЭЭ, высокоманевренных электрогенерирующих мощностей, гидроаккумулирующих электростанций, возобновляемых источников энергии (ВИЭ), электромобилей, экспорта ЭЭ, создание энергоемких производств) будет недостаточно, и требуются дополнительные исследования по разработке комплекса энергосберегающих мероприятий на ТЭЦ при их адаптации к условиям работы ОЭС с АЭС. Указанные обстоятельства придают особую актуальность задачи повышения

эффективности ТЭЦ с одновременным приданием им новых возможностей, способствующих решению системной задачи регулирования графика генерации ОЭС. Не потеряет актуальности дальнейшее снижение потребления ПГ и после ввода Белорусской АЭС. Из изложенного следует, что задача разработки комплекса энергосберегающих мероприятий на ТЭЦ при адаптации к условиям работы энергосистемы с Белорусской АЭС является актуальной, имеет важное практическое значение и ее решению посвящена настоящая работа.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Работа выполнена на кафедре «Промышленная теплоэнергетика и теплотехника» БНТУ. Тема диссертации утверждена приказом БНТУ от 15.01.2013 № 162-лс «Об утверждении тем диссертации, научных руководителей, консультантов и индивидуальных планов работы» и соответствует задачам, определенным Директивой Президента Республики Беларусь от 14.06.2007 № 3 «Экономия и бережливость – главные факторы экономической безопасности государства» с изм. от 26.01.2016; Концепцией энергетической безопасности Республики Беларусь (утв. Постановлением Совета Министров Республики Беларусь 13.12.2015 № 1084); Стратегией развития энергетического потенциала Республики Беларусь (утв. Постановлением Совета Министров Республики Беларусь 09.08.2010 № 1180); Государственной программой развития Белорусской энергетической системы на период до 2016 г. (утв. Постановлением Совета Министров Республики Беларусь 29.02.2012 № 194 с изм. 08.10.2013 № 892 и 17.12.2015 № 1052); Комплексным планом развития электроэнергетической сферы до 2025 года с учетом ввода Белорусской атомной электростанции (утв. Постановлением Совета Министров Республики Беларусь 01.03.2016 № 169); Отраслевой программой развития электроэнергетики на 2016–2020 годы (утв. Постановлением Министерства энергетики Республики Беларусь 31.03.2016 № 8).

Исследования по теме диссертации выполнялись в рамках программ реконструкции и технического перевооружения Бобруйской ТЭЦ-2 на период до 2020 г. (договор РУП «БЕЛТЭИ» № ИЦ-06/4-025 от 10.02.2009), Новополоцкой ТЭЦ на период 2008–2020 г.г. (договор РУП «БЕЛТЭИ» № ИЦ-06/4-031 от 18.08.2009), Светлогорской ТЭЦ на период до 2020 г. (договоры РУП «БЕЛТЭИ» № ИЦ-06/4-095 от 21.09.2011 и № ИЦ-13-07 от 25.11.2013).

Цель и задачи исследования

Цель исследований: разработать комплекс энергосберегающих мероприятий на ТЭЦ при адаптации к условиям работы энергосистемы с вводом Белорусской АЭС, позволяющих в совокупности повысить эффективность использования природного газа на ТЭЦ и в энергосистеме.

Для достижения указанной цели в диссертационной работе были поставлены и решены следующие **задачи исследования:**

1. Проанализировать структуру генерирующих мощностей и сложившихся электрических графиков ОЭС Беларуси, известные способы регулирования графика генерации электроэнергии и мероприятия по повышению эффективности ТЭЦ и энергосистемы после ввода в эксплуатацию Белорусской АЭС.

2. Проанализировать методы оценки энергетической эффективности ТЭЦ и энергосистемы. Разработать методику расчета термодинамической эффективности региональной энергосистемы с многопрофильными генерирующими источниками (ТЭС, котельные, АЭС), различными видами топлива, включая ядерное и получить количественные результаты на основе эксергетического метода анализа системы.

3. Исследовать эффективность ТЭЦ при внедрении в их состав парогазовых установок в условиях ОЭС Беларуси. Разработать новую структурную схему и целесообразные схемные решения на ТЭЦ с целью повышения эффективности использования ПГ и снижения его потребления на ТЭЦ и в энергосистеме.

4. Разработать математическую модель тепловой схемы ТЭЦ с абсорбционным бромисто-литиевым тепловым насосом для утилизации низкотемпературных тепловых потоков системы циркуляционного охлаждения и провести численный анализ эффективности их применения на ТЭЦ. Определить потенциал регулирования мощности генерации ЭЭ в ОЭС Беларуси при применении тепловых насосов в составе теплофикационных комплексов ТЭЦ.

5. Разработать комплекс энергосберегающих мероприятий на ТЭЦ при адаптации к условиям работы энергосистемы с вводом Белорусской АЭС и определить резервы экономии топлива в ОЭС Беларуси.

Объект исследования: ТЭЦ объединенной энергетической системы Беларуси в условиях ввода в ее состав Белорусской АЭС.

Предмет исследования: комплекс энергосберегающих мероприятий на ТЭЦ с введением в ее состав парогазовых установок, тепловых насосов, холодильных машин и режимы работы ТЭЦ в условиях функционирования Белорусской АЭС.

Научная новизна

Разработана методика расчета термодинамической эффективности региональной энергосистемы на основе индикативного критерия – эксергетического КПД, *учитывающая* многопрофильность энергогенерирующих источников (ТЭС, котельные, АЭС), использующих различные виды топлива, включая ядерное, *позволяющая* получать количественные значения термодинамической эффективности энергосистемы от внедрения энергосберегающих мероприятий.

Разработана новая структурная схема ТЭЦ с параллельными связями по интеграции высокотемпературной надстройки ГТУ по сбросной схеме, *отличающаяся* выбором соотношения числа ГТУ к числу сопрягаемых с ними котлоагрегатов по номинальной пропускной способности аэродинамического тракта которых выбирается единичная мощность ГТУ, по условию обеспечения работы котлоагрегатов на техническом минимуме и обеспечению требуемой надежности пароснабжения категорируемых теплопотребителей, что *обеспечивает* режимы работы ГТУ с максимальным числом часов использования номинальной мощности в течение года, диапазон маневренности 25–50 % от текущей мощности ТЭЦ при сохранении требуемой тепловой нагрузки соответственно в межотопительный и отопительный периоды, максимальную экономию природного газа на ТЭЦ и в энергосистеме.

Установлен оптимальный диапазон температур наружного воздуха при выборе холодопроизводительности абсорбционной бромисто-литиевой холодильной машины для охлаждения воздуха перед компрессором ГТУ парогазовых установок на ТЭЦ в межотопительный период для климатических условий Беларуси, который составляет 21–22 °С, что *позволяет обеспечить* экономию природного газа в энергосистеме до 6–13 т у. т. в год на один мегаватт используемой мощности ГТУ.

Разработана математическая модель тепловой схемы ТЭЦ с параллельными связями с применением абсорбционного бромисто-литиевого теплового насоса для утилизации низкотемпературных тепловых потоков системы циркуляционного охлаждения, *в отличии от известных, учитывающая* теплофикационную и производственную нагрузку, пропуск пара в конденсатор и отопительный коэффициента теплового насоса, *позволяющая* осуществлять моделирование и численный анализ различных переменных режимов работы ТЭЦ при оценке энергетических характеристик и термодинамической эффективности ТЭЦ.

Установлены регрессионные зависимости электрического КПД и удельной выработки электроэнергии на ТЭЦ от теплофикационной и

производственной нагрузок, пропуска пара в конденсатор турбоагрегата и отопительного коэффициента теплового насоса, *позволяющие аналитическим методом оптимизировать выбор* мощности абсорбционного бромисто-литиевого теплового насоса при интеграции его в тепловую схему ТЭЦ для обеспечения возможности снижения электрической мощности ТЭЦ в условиях разгрузки энергосистемы при сохранении требуемой мощности отпуска теплоты за счет утилизации низкотемпературных тепловых потоков системы циркуляционного охлаждения, что *обеспечивает* экономию топлива на ТЭЦ и в энергосистеме.

Разработан комплекс энергосберегающих мероприятий для развития тепловых схем ТЭЦ в условиях энергосистемы Беларуси, *включающий*: схемные решения применения ГТУ по сбросной схеме; применение абсорбционных бромисто-литиевых холодильных машин и тепловых насосов соответственно для охлаждения воздуха перед компрессором ГТУ и утилизации низкотемпературных тепловых потоков систем циркуляционного охлаждения, что *позволяет* повысить эффективность использования природного газа на ТЭЦ с параллельными связями и *обеспечить* экономию природного газа на ТЭЦ и в энергосистеме.

Положения, выносимые на защиту

1. Методика расчета термодинамической эффективности региональной энергосистемы на основе индикативного критерия - эксергетического КПД, *отличающаяся* учетом многопрофильности энергогенерирующих источников (ТЭС, котельные, АЭС), использующих различные виды топлива, включая ядерное, *позволяющая* получать количественные значения термодинамической эффективности энергосистемы от внедрения энергосберегающих мероприятий.

2. Новая структурная схема ТЭЦ с параллельными связями по интеграции высокотемпературной надстройки ГТУ по сбросной схеме, *отличающаяся* выбором соотношения числа ГТУ к числу сопрягаемых с ними котлоагрегатов по номинальной пропускной способностью аэродинамического тракта которых выбирается единичная мощность ГТУ, по условию обеспечения работы котлоагрегатов на техническом минимуме и обеспечению требуемой надежности пароснабжения категоризируемых теплопотребителей, что *обеспечивает* режимы работы ГТУ с максимальным числом часов использования номинальной мощности в течение года, диапазон маневренности 25–50 % от текущей мощности ТЭЦ при сохранении требуемой тепловой нагрузки соответственно в межотопительный и отопительный периоды и экономию природного газа на ТЭЦ и в энергосистеме.

3. Результаты теоретических исследований, *позволившие определить* условия эффективного применения абсорбционных бромисто-литиевых холодильных машин для охлаждения воздуха перед компрессором ГТУ парогазовых установок на ТЭЦ в межотопительный период для климатических условий Беларуси, что *обеспечивает* снижение потребления природного газа в энергосистеме.

4. Математическая модель тепловой схемы ТЭЦ с параллельными связями и абсорбционным бромисто-литиевым тепловым насосом для утилизации низкотемпературных тепловых потоков системы циркуляционного охлаждения и полученные на их основе результаты численных исследований, *позволившие установить* условия эффективного применения тепловых насосов, *обеспечивающие* экономию природного газа на ТЭЦ и в энергосистеме.

5. Результаты теоретических исследований и регрессионные зависимости электрического КПД и удельной выработки электроэнергии на ТЭЦ с абсорбционным бромисто-литиевым тепловым насосом, *отличающиеся* учетом теплофикационной и производственной нагрузок, пропуска пара в конденсатор турбоагрегата и отопительного коэффициента теплового насоса, *позволяющие аналитическим методом оптимизировать выбор* мощности абсорбционных бромисто-литиевых тепловых насосов при их интеграции в тепловую схему ТЭЦ для возможности снижения электрической мощности станции в условиях разгрузки электрического графика энергосистемы при сохранении требуемой мощности отпуска теплоты за счет утилизации низкотемпературных тепловых потоков системы циркуляционного охлаждения, что *обеспечивает* экономию природного газа на ТЭЦ и в энергосистеме.

6. Результаты технико-экономического анализа эффективности применения разработанного комплекса энергосберегающих мероприятий для развития тепловых схем ТЭЦ в условиях энергосистемы Беларуси, *включающего*: схемные решения применения ГТУ по сбросной схеме; применение абсорбционных бромисто-литиевых холодильных машин и тепловых насосов соответственно для охлаждения воздуха перед компрессором ГТУ и утилизации низкотемпературных тепловых потоков системы циркуляционного охлаждения, *позволившие обосновать* эффективность его применения, что *обеспечивает* повышение эффективности использования природного газа на ТЭЦ с параллельными связями и экономии природного газа на ТЭЦ и в энергосистеме.

Личный вклад соискателя ученой степени

Соискателем лично определены цель и задачи исследований, сформулированы основные положения, выносимые на защиту и разработаны: методика расчета термодинамической эффективности региональной энергосистемы на основе индикативного критерия – эксергетического КПД; новая структурная схема ТЭЦ с параллельными связями по интеграции высокотемпературной надстройки ГТУ по сбросной схеме; математическая модель тепловой схемы ТЭЦ с абсорбционным бромисто-литиевым тепловым насосом (АБТН), на базе которой проведено численное исследование; комплекс энергосберегающих мероприятий для развития тепловых схем ТЭЦ, включающий схемные решения применения ГТУ по сбросной схеме; применение абсорбционных бромисто-литиевых тепловых насосов и холодильных машин, позволяющих повысить эффективность использования природного газа на ТЭЦ и в энергосистеме. Также соискателем получены регрессионные зависимости для определения электрического КПД и удельной выработки электроэнергии (УВЭ); определены условия эффективного применения абсорбционных бромисто-литиевых холодильных машин (АБХМ) для охлаждения воздуха перед компрессором ГТУ в климатических условиях Беларуси; обоснована целесообразность применения АБТН для утилизации низкотемпературных тепловых потоков ТЭЦ; экономически обоснована целесообразность реализации энергосберегающих мероприятий на ТЭЦ, обеспечивающих экономию ПГ на ТЭЦ и в энергосистеме.

В написании статей, тезисов докладов приняли участие научный руководитель доктор технических наук, профессор В. Н. Романюк, академик НАН Беларуси Б.М. Хрусталеv, генеральный директор ГПО «Белэнерго» Е.О. Воронов, доктор технических наук, профессор В.А. Седнин, аспиранты Д.Б. Муслина, Н.А. Коломыцкая, магистранты Т.В. Бубырь, А.В. Романюк, директор ЗАО «Сервис тепло и хладооборудования» С.В. Мальков. Также автор выражает благодарность коллективу РУП «БЕЛТЭИ», который оказал содействие в обсуждении результатов диссертационной работы.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные положения работы докладывались и обсуждались на международных научно-технических конференциях (МНТК), республиканских конференциях и семинарах: Республиканская научно-практическая конференция «Перспективы развития энергетики в XXI веке» (Минск, 2011); IX, XI–XIV МНТК «Наука – образованию, производству,

экономике» (Минск, 2011, 2013–2016 гг.); XII МНТК студентов, аспирантов и молодых ученых «Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления» (Гомель, 2012); Belarusian-German seminar «Scientific and technical cooperation and technology transfer in the sphere of power efficiency and waste processing» (Минск, 2012); Белорусско-Германский семинар «Энергоэффективность и ресурсосбережение» (Минск, 2013); Форум проектов программ Союзного государства – IV Форум вузов инженерно-технологического профиля (Минск, 2014); МНТК «Современные научно-технические проблемы теплоэнергетики. Пути решения». (Саратов, 2014); Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием «Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии» (Екатеринбург, 2014); Белорусско-китайский молодежный инновационный форум «Новые горизонты 2014» (Минск, 2014); X, XII МНТК «Энергия-2015, 2017» (Иваново, 2015, 2017).

Результаты диссертационной работы используются в РУП «БЕЛТЭИ» при выполнении технико-экономических обоснований при модернизации ТЭЦ (Бобруйская ТЭЦ-2, Новополоцкая ТЭЦ, Светлогорская ТЭЦ), а также в учебном процессе на кафедре «Промышленная теплоэнергетика и теплотехника» БНТУ.

Опубликование результатов диссертации

Основные положения диссертации опубликованы в 37 работах, в том числе 20 статьях в рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК Республики Беларусь, 1 статье в тематических журналах и сборниках, 16 публикациях в научно-технических журналах и материалах научно-практических конференций. Общий объем опубликованных материалов – 15,8 авторских листов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из перечня условных обозначений, введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, списка использованных источников, списка публикаций соискателя и приложений. Полный объем диссертации 224 страницы. Работа содержит 103 страницы машинописного текста, 83 рисунка на 35 страницах и 21 таблицу на 13 страницах. Список использованных источников в количестве 336 наименований на 26 страницах, из них 60 на иностранных языках, 37 авторских работ на 4 страницах и 6 приложений на 43 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации.

В первой главе рассмотрены структура генерирующих мощностей ОЭС Беларуси и их использование в часы ночных провалов нагрузок (рисунок 1), дан прогноз нагрузок ОЭС и потребления ЭЭ в Беларуси до 2020 г, имеющие тенденцию к снижению (рисунок 2), и прогнозный типовой график электропотребления за зимние рабочие сутки (рисунок 3).

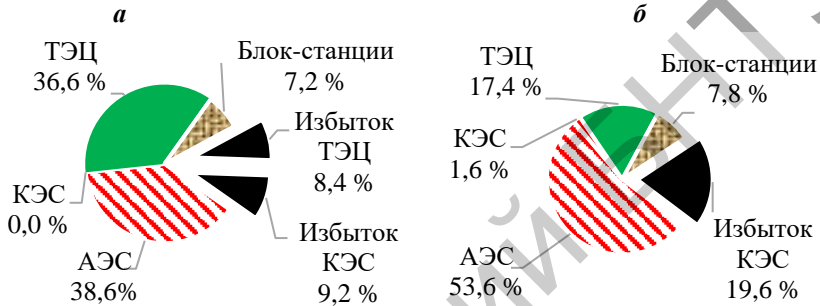


Рисунок 1. – Структура востребованной мощности ОЭС Беларуси в 2020 году в отопительный период (а) и межотопительный период (б)

Обзор литературных источников показал, что в ОЭС с преобладающей долей паротурбинных ТЭС, имеющей в своем составе АЭС, повышение эффективности использования ПГ возможно путем интеграции в состав ТЭЦ высокотемпературных надстроек на базе ГТУ. При этом необходимы дополнительные организационные и технические мероприятия по регулированию графика генерации ЭЭ не только с устранением перерасхода топлива, но и дальнейшим повышением эффективности его использования [11, 12, 15, 22]. В работе дан критический анализ решений по развитию тепловых схем ТЭЦ и возможности расширения диапазона изменения мощности генерации ЭЭ, позволивший сформулировать цель и задачи исследования, в рамках которого исследованы: графики генерации ЭЭ и известные способы их обеспечения [3, 13]; парогазовые установки и пути дальнейшего их совершенствованию в условиях ОЭС Беларуси [9, 27–35]; применение тепловых аккумуляторов на ТЭЦ для регулирования графика генерации ЭЭ [3, 4, 8, 21, 25]; влияние параметров ОС на характеристики ГТУ в межотопительный период и режимов работы ГТУ [1, 2, 22–24]; применение тепловых насосов для утилизации побочных низкотемпературных тепловых потоков ТЭЦ [5–7, 10–14, 16, 17, 26].

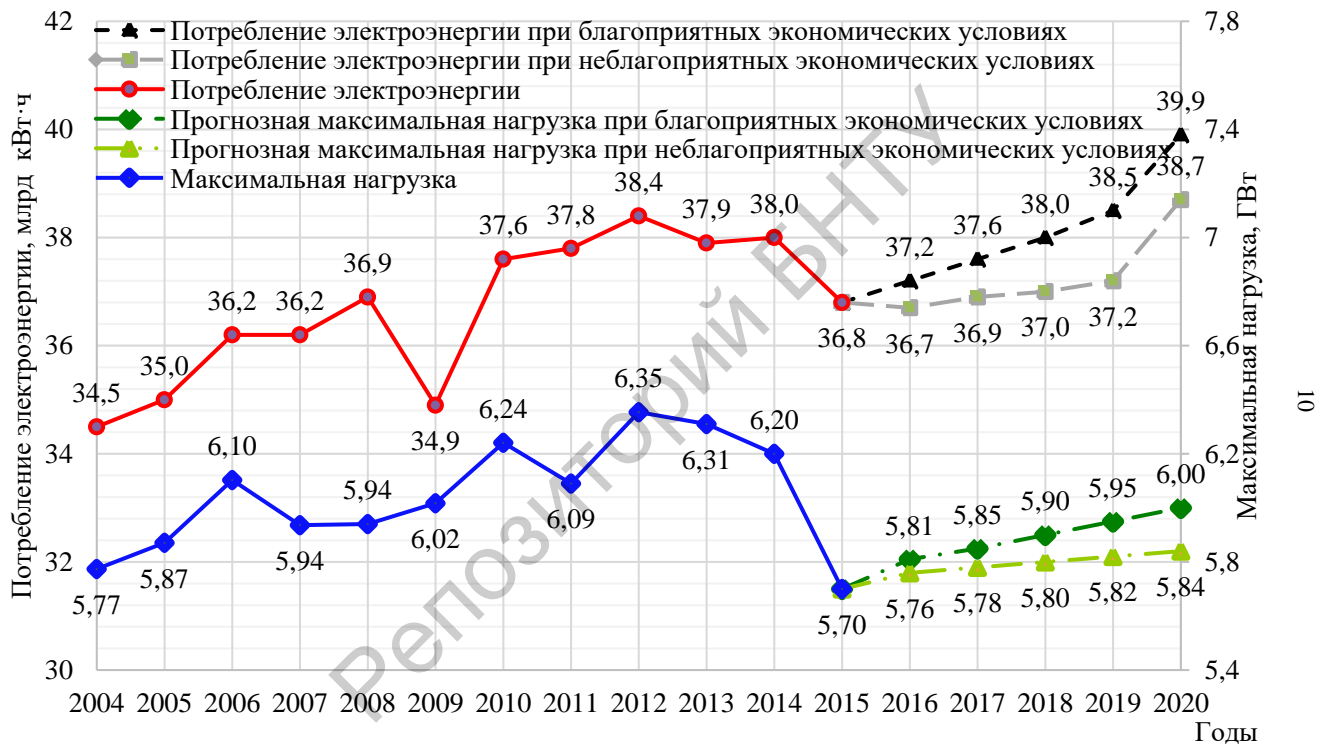


Рисунок 2. – Скорректированный прогноз потребления электроэнергии в Республике Беларусь и максимальной нагрузки энергосистемы в начале 2015 года

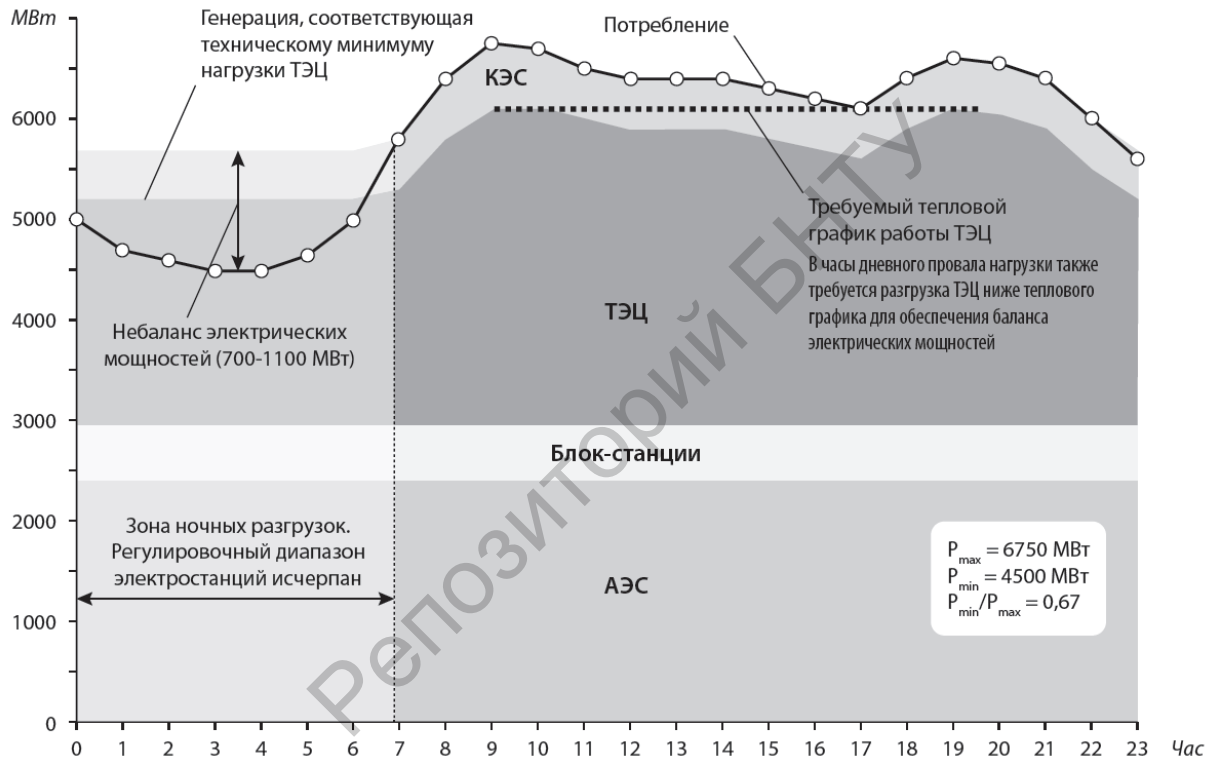


Рисунок 3. – Прогноз типовой графика покрытия электропотребления ОЭС Беларуси в зимний рабочий день 2020 г.

Проведенные исследования определили возможные решения и необходимость системного подхода, в рамках которого ТЭЦ получают возможность [15]: резервировать и изменять генерацию ЭЭ при сохранении отпуска ТЭ без перерасхода ПГ и без потери моторесурса оборудования; снизить УВЭ и удельный расход топлива (УРТ).

Во второй главе проанализированы методы оценки энергетической эффективности ТЭЦ и ОЭС с учетом концепции интенсивного энергосбережения (ИЭ), суть которой заключается в том, что все реализуемые мероприятия по снижению потребления энергоресурсов должны рассматриваться комплексно в системе, рамки которой выходят за физические границы отдельных установок и подсистем. Необходимо расширение энергосберегающей базы до всей ОЭС, что только и приводит к максимально полной реализации энергосберегающего эффекта. Концепция ИЭ связана с системными исследованиями, которые условно разделяются на компоненты: *вход* – обоснование актуальности темы и постановка цели и задач исследования; *процесс* – разработка математических моделей для проведения численного исследования и анализ полученных результатов, для чего требуется оценка энергетической и термодинамической эффективности ТЭЦ и ОЭС; *выход* – предполагает получение рациональных структурных схем и предлагаемых технических решений на базе результатов количественной оценки, полученных с использованием методики термодинамической эффективности энергосистемы.

Анализ результатов выполняется с помощью комплекса энергетических характеристик термодинамической эффективности ТЭЦ в составе:

- абсолютный электрический КПД

$$\eta_{э,абс} = W_э / Q_{топл}, \quad (1)$$

где $W_э$ – производство ЭЭ, ГДж; $Q_{топл}$ – теплота реакции горения топлива, ГДж.

- коэффициент полезного использования топлива

$$\eta_{ит} = (W_э + Q_т) / Q_{топл}, \quad (2)$$

где $Q_т$ – производство ТЭ, ГДж.

- эксергетический КПД

$$\eta_e = \Sigma E'' / \Sigma E', \quad (3)$$

где $\Sigma E''$, $\Sigma E'$ – эксергетический выход и вход системы, ГДж.

В ОЭС Беларуси традиционно используется УРТ на отпуск ЭЭ ($b_{\text{э}}$, кг/ГДж), который связан непосредственно с $\eta_{\text{э,абс}}$, $\eta_{\text{ит}}$ и принимаемой величиной УРТ на отпуск ТЭ ($b_{\text{т}}$, кг/ГДж)

$$b_{\text{э}} = 1 / \eta_{\text{э,абс}} [1 / Q_{\text{н}}^{\text{р}} - b_{\text{т}} (\eta_{\text{ит}} - \eta_{\text{э,абс}})], \quad (4)$$

где $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ – низшая теплота сгорания топлива на рабочую массу, ГДж/кг.

В работе предложен индикативный критерий для оценки термодинамической эффективности энергосистемы, являющейся сложной технической системой, объединяющий многопрофильные энергогенерирующие источники (ТЭС, котельные, АЭС), использующие различные виды топлива, включая ядерное [18] и разработана методика его расчета на примере ОЭС Беларуси.

В качестве индикативного критерия определен эксергетический КПД

$$\eta_{\text{е}} = (\sum W_{\text{э}}'' + \sum E_{\text{qp}}'' + \sum E_{\text{qсв}}'') / \sum E', \quad (5)$$

где $\sum W_{\text{э}}''$ – потоки отпущенной ЭЭ, ГДж; $\sum E_{\text{qp}}''$, $\sum E_{\text{qсв}}''$ – эксергии потоков теплоты котельных и ТЭЦ энергосистемы, отпущенной, соответственно, с паровым и водяным теплоносителями, ГДж; $\sum E'$ – эксергии потоков топлив, потребляемых ОЭС за анализируемый период времени, ГДж.

Эксергия потоков теплоты с паровым (E_{qp}'') и водяным ($E_{\text{qсв}}''$) теплоносителем определяется по формуле

$$E_{\text{q}}'' = Q \tau_{\text{е}} = Q \cdot (1 - T_0 / T), \quad (6)$$

где Q – количество тепловой энергии, отпущенной с паровым или водяным теплоносителем, ГДж; $\tau_{\text{е}}$ – эксергетическая температурная функция; T_0 , T – соответственно, характерные температуры ОС и соответствующих теплоносителей, отпускаемых за анализируемый период времени, К.

Для нахождения эксергии топлива используются известные методики из литературных источников, в частности, работ В.М. Бродянского. В условиях ОЭС Беларуси расчет эксергии используемых топлив может быть сведен к расчету эксергии эквивалентного количества ПГ, поскольку вклад в приходную часть энергобаланса страны прочих первичных энергоресурсов несоизмерим с удельным весом ПГ, и результирующая погрешность определения показателя оказывается меньшей объективных ошибок прочих данных [18].

Третья глава посвящена исследованию ПГУ на ТЭЦ ОЭС Беларуси: сбросных схем и с параллельной схемой работы. На ТЭЦ, не допускающих перерыва в пароснабжении потребителей, требуется содержать в работе одновременно несколько паровых котлоагрегатов (ПКА), что ухудшает показатели экономичности ПГУ-ТЭЦ, не полностью используется энергосберегающий потенциал. Для устранения потери эффективности ТЭЦ с категоризируемыми потребителями пара показана целесообразность применения новой структурной схемы ТЭЦ с параллельными связями при интеграции высокотемпературной надстройки ГТУ по сбросной схеме с ПКА. Предлагается использование комплексов «ГТУ-ПКА» в составе одной ГТУ и двух ПКА с возможностью работы ГТУ с любым из них, когда один работает, второй в резерве (рисунок 4).



Рисунок 4. – Принципиальная схема комплекса «ГТУ-ПКА»

Решение обеспечивает увеличение числа часов работы ГТУ за счет возможности замещения одного котла другим. Мощность ГТУ, ограничиваемая пропускной способностью аэродинамического тракта ПКА, в условиях ТЭЦ Беларуси находится в пределах 25–45 МВт. ГТУ этой мощности менее требовательны к режимам изменения нагрузки, что позитивно сказывается на моторесурсе. Количество параллельно работающих ПКА определяется тепловой нагрузкой ТЭЦ, при этом рассматривается их работа на техническом минимуме, что обеспечивает и максимальное вытеснение прямого сжигания ПГ, и возможность изменения генерации ЭЭ в диапазоне 25–50 % от текущей мощности ТЭЦ при сохранении тепловых нагрузок и надежности пароснабжения категоризируемых теплопотребителей [9, 15, 18, 27]. В итоге сбросная схема при сохранении тепловых нагрузок позволяет увеличить электрический абсолютный КПД ТЭЦ с 22 до 43 %, коэффициент полезного использования топлива – с 80 до 89 % и эксергетический КПД – с 33 до 50 % [9].

В комплексе мероприятий рассмотрена стабилизация характеристик ГТУ в межотопительный период за счет охлаждения с помощью АБХМ воздуха перед компрессором ГТУ до $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, при которых ГТУ сохраняют номинальные КПД и мощность, получено выражение для оценки экономии ПГ [1, 2, 22–24]. Определены системная экономия топлива от применения АБХМ (рисунок 5) и сроки возврата инвестиций (рисунок 6).

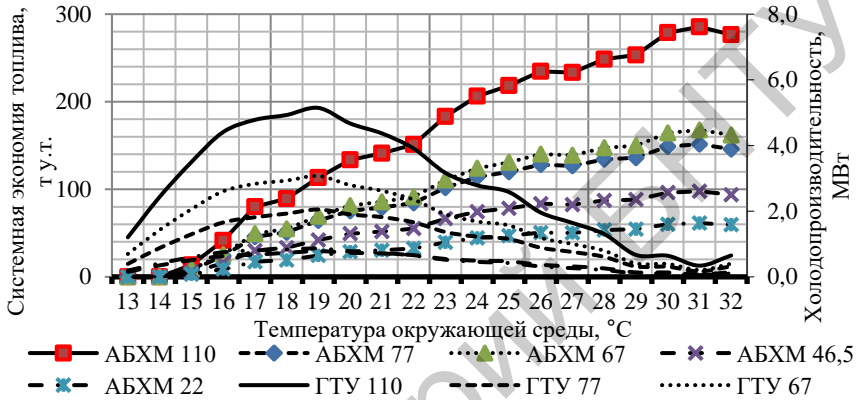


Рисунок 5. – Зависимость системной экономии топлива, мощности АБХМ от температуры окружающей среды

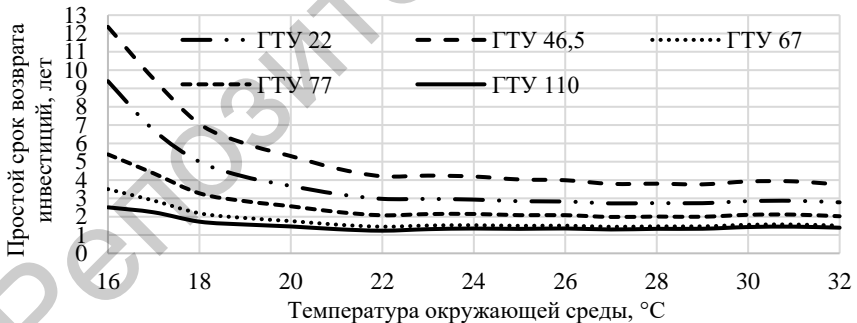


Рисунок 6. – Зависимость срока возврата инвестиций от температуры окружающей среды для различных мощностей ГТУ

Решение в Беларуси энергетически и экономически целесообразно и обеспечивает годовую экономию ПГ до 6–13 т.т.т. на 1 МВт используемой мощности ГТУ. Определяющим значением температуры окружающей среды для выбора холодопроизводительности АБХМ в условиях Беларуси является $21\text{--}22\text{ }^{\circ}\text{C}$ независимо от мощности ГТУ [1, 2, 22].

В четвертой главе разработана математическая модель тепловой схемы ТЭЦ с АБТН для утилизации низкотемпературных тепловых потоков систем циркуляционного охлаждения, в рамках которой на этапе системного исследования «процесс» получена расчетная технологическая схема (рисунок 7) [17].

Затем для элементов системы записываются следующие уравнения:

- баланса энергии для k -го элемента

$$\sum_{j=1}^{N_k} (\gamma_j \cdot G_j \cdot h_j) + \sum_{n=1}^{P_k} (\gamma_n \cdot E_n) = 0, \quad (7)$$

где γ_j, γ_n – коэффициенты, учитывающие рассеяние части потока энергии в ОС; G_j – массовый расход потока материального j -го носителя энергии за анализируемый период, т; h_j – удельная массовая энтальпия носителя, ГДж/т; E_n – энергия электрическая или механическая n -й связи за анализируемый период, ГДж; N_k, P_k – соответственно количество материальных потоков и нематериальных потоков энергии, пересекающих контрольную поверхность данного элемента системы.

- материального баланса для i -го энергоносителя в k -м элементе

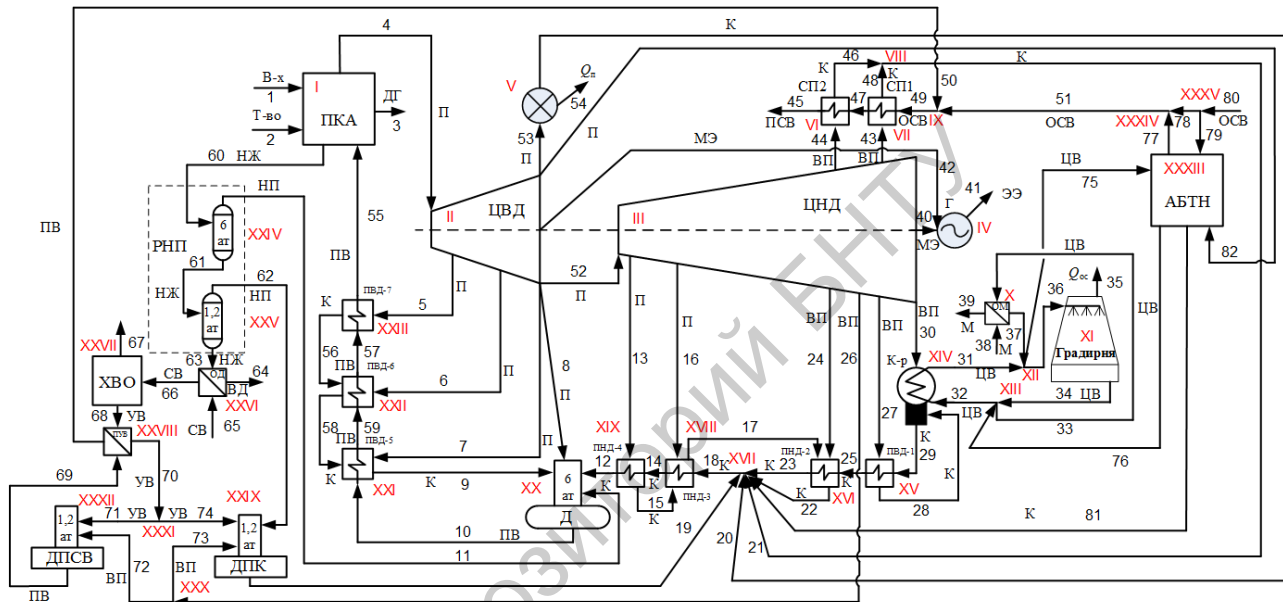
$$\sum_{j=1}^{N_{ki}} G_j = 0, \quad (8)$$

Далее находится решение полученной системы уравнений и в рамках этапа «выход» выполняется анализ результатов с помощью комплекса энергетических характеристик для оценки эффективности ТЭЦ.

С помощью разработанной математической модели тепловой схемы ТЭЦ с АБТН проведен численный анализ эффективности применения АБТН на ТЭЦ с помощью выполненного эксперимента по исследованию изменения электрического КПД и УВЭ на ТЭЦ с учетом значимых факторов. Проведено ранжирование факторов, определен общий вид уравнений регрессии [16].

$$\omega_q = D_k, Q_\tau, Q_\mu, \mu, \quad (9)$$

где D_k – пропуск пара в конденсатор, теплота конденсации которого утилизируется с помощью АБТН, т/ч; Q_τ, Q_μ – соответственно, теплофикационная и производственная нагрузки турбины, ГДж/ч; μ – отопительный коэффициент АБТН.



I-XXXV – элементы технической системы, 1-82 – вид связи

ПКА – паровой котлоагрегат, РНП – расширитель непрерывной продувки, ОД – охладитель дренажа, ХВО – химводоподготовка,

ПУВ – подогреватель умягченной воды, ДПСВ – деаэратор подпитки тепловой сети, ДПК – деаэратор подпитки конденсата,

ЦВД – цилиндр высокого давления, ЦНД – цилиндр низкого давления, ПВД – подогреватель высокого давления, ПНД – подогреватель

низкого давления, Д – деаэратор, К-р – конденсатор, ОСВ – обратная сетевая вода, ПСВ – прямая сетевая вода, СП1, СП2 – сетевые подо-

греватели, ДГ – дымовые газы, П – пар, ВП – влажный пар, К – конденсат, ЦВ – циркуляционная вода, МЭ – механическая энергия,

ЭЭ – электроэнергия, ПВ – питательная вода, НЖ – насыщенная жидкость, НП – насыщенный пар, УВ – умягченная вода, СВ – сырая вода

Рисунок 7. – Расчетная технологическая схема ТЭЦ с АБТН

Принята нелинейная математическая модель второго порядка

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_4 \cdot x_4 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2 + b_{33} \cdot x_3^2 + b_{44} \cdot x_4^2 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{14} \cdot x_1 \cdot x_4 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{24} \cdot x_2 \cdot x_4 + b_{34} \cdot x_3 \cdot x_4, \quad (10)$$

где x_i – безразмерные факторы, соответствующие: x_1 – утилизируемому потоку теплоты, определяемый по величине пропуска пара в конденсатор (D_k); x_2 – нагрузке производственного отбора (Q_n); x_3 – теплофикационной нагрузке (Q_t); x_4 – отопительному коэффициенту; b_0, b_i, b_{ii}, b_{ij} – коэффициенты уравнения регрессии; i – номер фактора; j – индекс коэффициента, $1 \leq i \leq j \leq 4$.

Выбраны диапазон изменения факторов, экспериментальный ортогональный план второго порядка с общим числом точек матрицы планирования 25, удалением звездных точек от центра 1,414. С помощью математической модели тепловой схемы ТЭЦ, в которую интегрирован АБТН, и режимных карт работы турбоагрегатов ПТ-60 двух ТЭЦ рассчитаны значения функций отклика. Для устранения систематических неучтенных ошибок порядок расчетов точек плана рандомизировался во времени, устанавливаемый появлением номера точки в ряду случайных чисел. Расчеты функций отклика дублировались в каждой точке привлечением данных режимных карт работы действующих турбоагрегатов ПТ-60 Светлогорской ТЭЦ и Бобруйской ТЭЦ-2. С учетом значимости коэффициентов уравнений регрессии получены соотношения для [16]:

– электрического КПД, %

$$\eta_e = 62 + 0,276x_1 + 1,12x_2 + 0,465x_3 - 0,307x_2x_3, \quad (11)$$

– УВЭ на тепловом потреблении, кВт·ч/Гкал

$$\omega_q = 387 - 1,45x_1 + 22,3x_2 + 6,5x_4, \quad (12)$$

Адекватность моделей с доверительной вероятностью 95 % устанавливалась по критерию Фишера. Расхождение фактических и расчетных значений отклика в точках плана не превышает в относительном выражении 2,4 % для электрического КПД и 5,2 % для УВЭ, что соответствует погрешности исходных данных и математической модели.

С именованными факторами уравнения регрессии имеют вид [16]:

– электрического КПД, %

$$\eta_{\text{э}} = 38,2 + 0,098D_{\text{к}} + 0,263Q_{\text{т}} + 0,467Q_{\text{п}} - 0,0051Q_{\text{т}}Q_{\text{п}}, \quad (13)$$

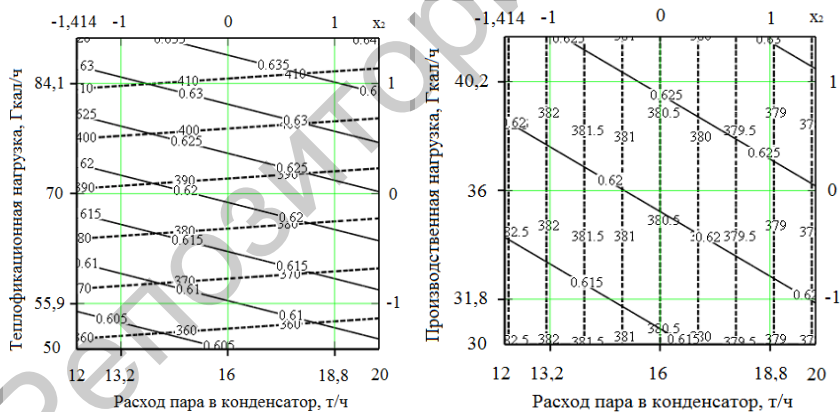
– УВЭ на тепловом потреблении, кВт·ч/Гкал

$$\omega_q = 211 - 0,51D_{\text{к}} + 1,57Q_{\text{т}} + 45,7\mu, \quad (14)$$

где изменение аргументов находится в диапазонах:

- $12 \leq D_{\text{к}} \leq 20$ т/ч – пропуск пара в конденсатор, теплота конденсации которого утилизируется, влияющий на мощность АБТН;
- $209 (50) \leq Q_{\text{т}} \leq 377 (90)$ ГДж/ч (Гкал/ч) – теплофикационная нагрузка;
- $126 (30) \leq Q_{\text{п}} \leq 176 (42)$ ГДж/ч (Гкал/ч) – производственная нагрузка;
- $1,4 \leq \mu \leq 1,8$ – отопительный коэффициент АБТН.

С помощью уравнений регрессии построены двумерные сечения гиперболоидной поверхности, (рисунок 8).



а) $Q_{\text{п}} = 36$ Гкал/ч ($x_3 = 0$), $\mu = 1,6$ ($x_4 = 0$); б) $Q_{\text{т}} = 70$ Гкал/ч ($x_2 = 0$), $\mu = 1,6$ ($x_4 = 0$)

Рисунок 8. – Изолинии изменения электрического КПД и УВЭ при постоянных производственной (а) и теплофикационной (б) нагрузке и отопительном коэффициенте АБТН

Из анализа сечений следует: электрический КПД и УВЭ интерпретируются простой гиперповерхностью; доминирующим фактором является теплофикационная нагрузка, меньшее влияние оказывают производственная нагрузка и теплота утилизации; имеет место монотонность изменения откликов с ростом всех факторов, при этом, влияние отопительного коэффициента АБТН практически не зависит от тепловых нагрузок и теплоты утилизации, величина УВЭ зависит в определяющей степени от теплофикационной нагрузкой [16].

Системная экономия топлива от применения АБТН на одной ТЭЦ составляет до 5,5 тыс. т у. т. в год [5]. Для выполнения экономических требований АБТН должен иметь отопительный коэффициент не ниже 1,7 и величина утилизируемого потока теплоты не должна превышать значение, соответствующее технически минимальному пропуску пара в конденсатор, (рисунок 9) [13, 16].

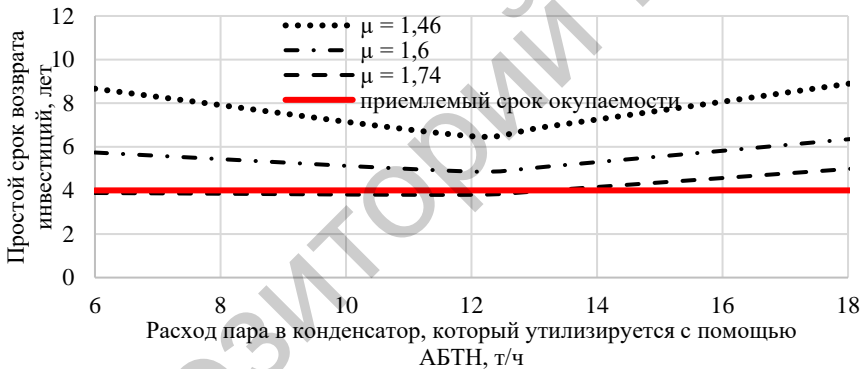


Рисунок 9. – Простой срок возврата инвестиций от установки на ТЭЦ с ПТ-60-130 АБТН, в зависимости от его основных характеристик

Изменение показателей работы ТЭЦ при работе с АБТН зависит от тепловых нагрузок и в характерном режиме имеет место:

- простой срок возврата инвестиций не превышает четырех лет;
- УРТ на отпуск ЭЭ снижается на 20–30 г/(кВт·ч);
- электрический КПД растет на 6,5 %;
- коэффициент использования топлива увеличивается на 4,6 %;
- электрический абсолютный КПД и УВЭ уменьшаются, соответственно, на 0,6 % и на 11 кВт·ч/ГДж (46 кВт·ч/Гкал), что способствует улучшению ситуации с обеспечением графика электрической нагрузки энергосистемы [13–15].

В пятой главе проведен системный анализ прогнозируемой ситуации в ОЭС Беларуси, с вводом в ее состав АЭС, из которого следует, что возможен ряд технических и организационных мероприятий [15]:

1. Технические мероприятия, реализующие комплексный подход в широком смысле слова, охватывающий все возможные мероприятия на всех крупных ТЭЦ и в их зонах теплоснабжения. В первую очередь реализация на ТЭЦ решений по установке АБТН с расширением утилизации низкотемпературных тепловых потоков, надстроек ГТУ по сбросной схеме с стабилизацией их характеристик.

2. Экономические шаги и нормативные акты, стимулирующие население и предприятия к потреблению ЭЭ в ночные часы. Лучшим решением может быть экспорт ЭЭ в соседние страны, но его реализация связана с политической конъюнктурой и большими рисками. Более реально объединение энергосистем стран ЕврАзЭС.

Комплекс энергосберегающих мероприятий, предлагаемых в работе, позволяет существенно снизить потребление ПГ на ТЭЦ и в энергосистеме, и обеспечить определенную маневренность ТЭЦ при сохранении тепловых нагрузок без перерасхода топлива [19]. Максимальное повышение показателей имеет место при совместном использовании АБТН и ГТУ по сбросной схеме: электрический КПД ТЭЦ растет на $\approx 27\%$, электрический абсолютный КПД расчет на $\approx 20\%$, эксергетический КПД растет на $\approx 16\%$, при годовой системной экономии до 68 тыс. т. у. т. только на одной ТЭЦ [19]. При реализации этих мероприятий на всех крупных ТЭЦ ОЭС Беларуси, в случае полной ее автономности, когда резервирование мощности обеспечивается с расчетом только на собственные силы за счет ввода пускорезервных мощностей в объеме 0,8 ГВт, суммарная мощность надстроек ГТУ по сбросной схеме составит до 0,6 ГВт, тепловая мощность АБТН до 0,44 ГВт.

В этом случае в ОЭС обеспечивается снижение средневзвешенного УРТ на отпуск ЭЭ во время дневного пика нагрузок на 23 г/(кВт·ч) с существующих 176 до 153 г/(кВт·ч). В часы ночных провалов нагрузок снижение УРТ на 10 г/(кВт·ч) с существующих 196 до 186 г/(кВт·ч).

Интегральная экономия ПГ по системе составит до 0,74 млн т у. т. в год, что эквивалентно снижению затрат на 0,12 млрд USD, при этом обеспечивается выполнение экономических ограничений, предъявляемых к проектам подобного рода [15, 19].

В главе оценена термодинамическая эффективность энергосистемы с помощью индикативного критерия – эксергетического КПД и традиционных оценок за прошедший период (рисунок 10) [18, 19].

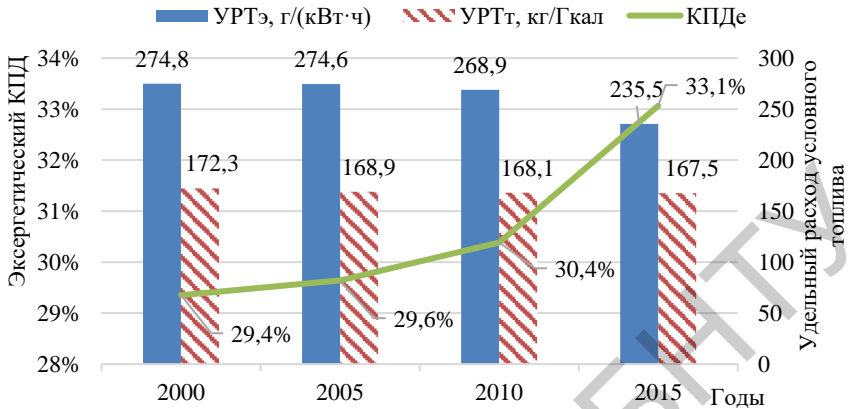


Рисунок 10. – Изменение различных характеристик ОЭС Беларуси в период 2000–2015 г.г.

В результате реализации всех рассмотренных энергосберегающих мероприятий ожидается повышение эксергетического КПД ОЭС Беларуси на 1,4 и 1,9 %, соответственно, в отопительный и межотопительный периоды [19]. С вводом Белорусской АЭС снижается термодинамическая эффективность ОЭС Беларуси (эксергетический КПД снижается с 33,1 до 30,6 %). Вместе с тем, предлагаемое развитие крупных ТЭЦ энергосистемы обеспечивает увеличение ее термодинамической эффективности в среднем за год на 1,6 %, т. е. до 32,2 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Разработана методика расчета термодинамической эффективности региональной энергосистемы на основе индикативного критерия – эксергетического КПД, *учитывающая* многопрофильность энергогенерирующих источников (ТЭС, котельные, АЭС), использующих различные виды топлива, включая ядерное, *позволяющая* получать количественные значения термодинамической эффективности энергосистемы от внедрения энергосберегающих мероприятий. *Установлено*, что термодинамическая эффективность ОЭС Беларуси после ввода Белорусской АЭС уменьшается с 33,1 до 30,6 % и после реализации энергосберегающих мероприятий по установке ГТУ по сбросной схеме и АБТН на всех ТЭЦ ОЭС Беларуси эффективность увеличивается до 32,2 % [18, 19].

2. Разработана новая структурная схема ТЭЦ по интеграции высокотемпературной надстройки по сбросной схеме сопряжения ГТУ с котлоагрегатом, *отличающаяся* выбором соотношения числа ГТУ к числу сопрягаемых с ними котлоагрегатов по номинальной пропускной способностью аэродинамического тракта которых выбирается единичная мощность ГТУ, по условию обеспечения работы котлоагрегатов на техническом минимуме и обеспечению требуемой надежности пароснабжения категорируемых теплопотребителей, *чем достигаются* режимы работы ГТУ с максимальным числом часов использования номинальной мощности в течение года, повышение эффективности: абсолютный электрический КПД увеличивается с 22,1 до 42,1 %, электрический КПД – с 55,1 до 78,7 %, коэффициент использования топлива – с 82,0 до 88,6 %, эксергетический КПД – с 35,2 до 50,6 % и диапазон маневренности 25–50 % от текущей мощности ТЭЦ при сохранении требуемой тепловой нагрузки соответственно в межотопительный и отопительный периоды и *обеспечивается* годовая экономия природного газа в ОЭС Беларуси до 0,065 млн т у. т. (0,59 %) при реализации на одной ТЭЦ и до 0,62 млн т у. т. (6,8 %) при реализации на всех ТЭЦ [9, 12, 27–35].

3. *Установлен* оптимальный диапазон температур наружного воздуха при выборе холодопроизводительности абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины для охлаждения воздуха перед компрессором ГТУ парогазовых установок на ТЭЦ в межотопительный период для климатических условий Беларуси, который составляет 21–22 °С, что *обеспечит* экономию природного газа в ОЭС Беларуси до 6–13 т у. т. в год на один мегаватт используемой мощности ГТУ [1, 2, 22–24].

4. Разработана математическая модель тепловой схем ТЭЦ с параллельными связями с абсорбционным бромистолитиевым тепловым насосом для утилизации низкотемпературных тепловых потоков систем циркуляционного охлаждения, *учитывающая* теплофикационную и производственную нагрузку, пропуск пара в конденсатор и отопительный коэффициента теплового насоса и получены на их основе результаты численных исследований, *позволившие установить* условия эффективного применения тепловых насосов: электрический КПД увеличивается с 55,1 до 57,7 %, коэффициент полезного использования топлива – с 82,0 до 84,4 %, эксергетический КПД – с 35,2 до 35,5 %, и *обеспечивается* изменение маневренности ТЭЦ в диапазоне 0–0,15 ГВт при экономии природного газа в ОЭС Беларуси до 3,1 тыс. т у. т. (0,03 %) при реализации на одной ТЭЦ и до 0,11 млн т у. т. (1,2 %) при осуществлении их на всех ТЭЦ [17].

5. Установлены регрессионные зависимости электрического КПД и удельной выработки электроэнергии на тепловом потреблении ТЭЦ с абсорбционными бромисто-литиевыми тепловыми насосами, отличающиеся учетом теплофикационной и производственной нагрузок, пропуска пара в конденсатор турбоагрегата и отопительного коэффициента теплового насоса, позволяющие аналитическим методом оптимизировать выбор мощности абсорбционных бромисто-литиевых тепловых насосов, соответствующую минимальному технически возможному пропуску пара в конденсатор турбоагрегата, при их интеграции в тепловую схему ТЭЦ для обеспечения возможности снижения электрической мощности станции в условиях разгрузки электрического графика энергосистемы при сохранении требуемой мощности отпуска теплоты за счет утилизации низкотемпературных тепловых потоков системы циркуляционного охлаждения, чем достигается экономия топлива на ТЭЦ и в энергосистеме [16].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Разработанный комплекс энергосберегающих мероприятий на ТЭЦ, позволит повысить эффективность использования природного газа, в сравнении с типовой паротурбинной ТЭЦ повышенных начальных параметров: абсолютный электрический КПД увеличится с 22,1 до 42,3 %, электрический КПД – с 55,1 до 82,4 %, коэффициент использования топлива – с 82,0 до 90,9 %, эксергетический КПД – с 35,2 до 50,9 %. Годовая экономия природного газа в энергосистеме составит до 0,068 млн т у. т. (0,63 %) при реализации разработанного комплекса энергосберегающих мероприятий на одной ТЭЦ и до 0,74 млн т у. т. (8,0 %) при реализации мероприятий на всех ТЭЦ, в сравнении с базовым вариантом работы ОЭС Беларуси в условиях Белорусской АЭС [5–7, 9–17, 22, 26–35].

Разработанная методика расчета термодинамической эффективности региональной энергосистемы на основе индикативного критерия – эксергетического КПД может быть использована при проведении исследований по оценке влияния различных энергосберегающих мероприятий и технических решений на эффективность энергосистемы и принятии стратегических решения по ее развитию.

Результаты диссертационной работы используются в РУП «БЕЛТЭИ» при выполнении технико-экономических обоснований при модернизации существующих ТЭЦ (Бобруйской ТЭЦ-2, Новополоцкой ТЭЦ, Светлогорской ТЭЦ) при переходе на парогазовую технологию (акт использования).

Результаты диссертационного исследования используются в учебном процессе на кафедре «Промышленная теплоэнергетика и теплотехника» БНТУ при выполнении дипломных проектов и при чтении лекций магистрантам, аспирантам по дисциплинам «Энергоэффективные технологии в энергетике и промышленности» и «Комбинированные и энерготехнологические установки в промышленности» (акт использования).

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в изданиях, включенных в перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований

1. Романюк, В.Н. Повышение эффективности использования природного газа / В.Н. Романюк, А.А. Бобич, Н.А. Коломыцкая и др. // Вестник БНТУ. – 2011. – № 2. – С. 72–75.

2. Романюк, В.Н. Повышение эффективности ГТУ в летний период / В.Н. Романюк, А.А. Бобич, Н.А. Коломыцкая и др. // Энергия и Менеджмент. – 2011. – № 1 (58). – С. 18–22.

3. Романюк, В.Н. Регулирование генерации электроэнергии при повышении эффективности использования ТЭЦ / В.Н. Романюк, А.А. Бобич, Н.А. Коломыцкая и др. // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2012. – № 2. – С. 67–78.

4. Романюк, В.Н. Эффективное обеспечение графика нагрузок энергосистемы / В.Н. Романюк, А.А. Бобич, Н.А. Коломыцкая и др. // Энергия и Менеджмент. – 2012. – № 1 (64). – С. 13–20.

5. Романюк, В.Н. Абсорбционные тепловые насосы в тепловой схеме ТЭЦ для повышения ее энергетической эффективности / В.Н. Романюк, Д.Б. Муслина, А.А. Бобич и др. // Энергия и Менеджмент. – 2013. – № 1 (70). – С. 14–19.

6. Романюк, В.Н. Развитие энергосбережения на базе инновационной технологии абсорбционных тепловых насосов / В.Н. Романюк, А.А. Бобич, Д.Б. Муслина, и др. // Энергоэффективность. – 2013. – № 2. – С. 28–30.

7. Романюк, В.Н. Абсорбционные тепловые насосы в теплоэнергетических системах промышленных предприятий для снижения энергетических и финансовых затрат / В.Н. Романюк, А.А. Бобич, Д.Б. Муслина, и др. // Энергия и Менеджмент. – 2013. – № 2 (71). – С. 32–37.

8. Романюк, В.Н. Пути повышения эффективности использования первичного топлива в Республике Беларусь / В.Н. Романюк, Д.Б. Муслина, А.А. Бобич, и др. // Энергетическая стратегия. – 2013. – № 3 (33). – С. 39–43.

9. Романюк, В.Н. Выбор схем парогазовых установок при модернизации паротурбинных ТЭЦ / В.Н. Романюк, А.А. Бобич, Н.А. Коломыцкая. // Энергия и Менеджмент. – 2013. – № 3 (72). – С. 11–15.

10. Романюк, В.Н. Абсорбционные или парокомпрессионные тепловые насосы в схемах ТЭЦ / В.Н. Романюк, А.А. Бобич, С.В. Мальков. // Энергия и Менеджмент. – 2013. – № 4–5 (73–74). – С. 18–21.

11. Хрусталеv, Б.М. К вопросу развития энергообеспечения промышленных теплотехнологий и систем теплоснабжения в Беларуси. Взгляд в ближайшее будущее и обозримую перспективу / Б.М. Хрусталеv, В.Н. Романюк, В.А. Седнин, А.А. Бобич, Д.Б. Муслина, Т.В. Бубырь // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2014. – № 6. – С. 31–47.

12. К вопросу развития энергообеспечения промышленных теплотехнологий и систем централизованного теплоснабжения / Б.М. Хрусталеv, В.Н. Романюк, А.А. Бобич // Перспективные материалы и технологии : монография. в 2 т. / под ред. В.В. Клубовича. – Витебск : УО «ВГТУ», 2015. – Т. 2. – С. 275–292.

13. Романюк, В.Н. Абсорбционные тепловые насосы на ТЭЦ Белорусской ОЭС на примере Мозырской ТЭЦ / В.Н. Романюк, А.А. Бобич // Энергия и Менеджмент. – 2015. – № 1 (82). – С. 4–11.

14. Романюк, В.Н. Развитие тепловых схем ТЭЦ в условиях Объединенной энергосистемы Беларуси / В.Н. Романюк, А.А. Бобич // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2015. – № 4. – С. 31–43.

15. Романюк, В.Н. К вопросу о диверсификации вариантов регулирования мощности генерации Белорусской энергосистемы / В.Н. Романюк, А.А. Бобич // Энергия и Менеджмент. – 2015. – № 6 (87). – С. 3–8.

16. Романюк, В.Н. Обоснование параметров АБТН для утилизации ВЭР на ТЭЦ с помощью пассивного эксперимента и определение соответствующих изменений различных оценок работы энергосистемы / В.Н. Романюк, А.А. Бобич // Энергия и Менеджмент. – 2016. – № 1 (88). – С. 14–23.

17. Романюк, В.Н. Численное исследование тепловых схем ТЭЦ с помощью их топологических моделей / В.Н. Романюк, А.А. Бобич // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2016. – № 4. – С. 376–390.

18. Воронов, Е.О. К вопросу оценки термодинамической эффективности Белорусской энергосистемы / Е.О. Воронов, В.Н. Романюк, В.А. Седнин, А.А. Бобич // Энергия и Менеджмент. – 2016. – № 3 (90). – С. 2–7.

19. Романюк, В.Н. Оценка термодинамической эффективности функционирования энергосистемы Беларуси в условиях работы Белорусской АЭС / В.Н. Романюк, А.А. Бобич // Энергия и Менеджмент. – 2016. – № 4 (91). – С. 2–9.

20. Романюк, В.Н. Время применения абсорбционных бромистолитиевых тепловых насосов на ТЭЦ Беларуси / В.Н. Романюк, А.А. Бобич // Энергия и Менеджмент. – 2017. – № 2 (95). – С. 2–5.

Статьи в тематических журналах и сборниках

21. Бобич, А.А. Регулирование генерации электроэнергии и повышение эффективности использования ТЭЦ в отопительный период // Проблемы теплоэнергетики : сб. науч. тр. / Саратовск. Гос. ун-т ; редкол. : Ю.Е. Николаев [и др.]. – Саратов, 2012. – С. 45–52.

Материалы докладов на конференциях, семинарах, тезисы докладов

22. Романюк, В.Н. Комплекс мероприятий по повышению эффективности ТЭЦ энергосистемы / В.Н. Романюк, А.А. Бобич // Энергоэффективность. – 2012. – июнь. – С. 30–31.

23. Романюк, В.Н. Стабилизация работы использования газотурбинных надстроек паротурбинных ТЭС и промышленных теплотехнологий / В.Н. Романюк, Д.Б. Муслина, А.А. Бобич // Перспективы развития энергетики в XXI в. : материалы Респ. науч.-практ. конф., Минск 12–14 мая 2010 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол. : С.М. Силук [и др.]. – Минск, 2011. – С. 61.

24. Романюк, В.Н. Повышение эффективности использования газотурбинных установок в промышленности / В.Н. Романюк, Д.Б. Муслина, А.А. Бобич // Перспективы развития энергетики в XXI в. : материалы Респ. науч.-практ. конф., Минск 12–14 мая 2010 г. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол.: С.М. Силук [и др.]. – Минск, 2011. – С. 70.

25. Бобич, А.А. Регулирование генерации электроэнергии при повышении эффективности ТЭЦ / А.А. Бобич // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XII Междунар. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов и молодых ученых., 26–27 апр. 2012 г. / М-во образ. Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П.О. Сухого. – Гомель, 2012. – С. 163–166.

26. Romanyuk, V.N. Usage of absorption heat pumps in the CHP steam turbine scheme / V.N. Romanyuk, A.A. Bobich // Scientific and technical cooperation and technology transfer in the sphere of power efficiency and waste processing: Belarusian-German seminar, Minsk, 10–12 December 2012 / BNTU. – Minsk, 2012. – P. 28–29.

27. Romanyuk, V.N. High-temperature gas turbine superposed plan in CHP technological schemes / V.N. Romanyuk, A.A. Bobich // «Energy efficiency and resource saving : Belarusian-German seminar, Minsk, 3–5 June 2013 / BNTU. – Minsk, 2013. – P. 20–23.

28. Бобич, А.А. Оптимизация с целью повышения экономии топлива схем высокотемпературных газотурбинных надстроек паротурбинных ТЭЦ / А.А. Бобич // Наука – образованию, производству экономике : материалы Одиннадцатой междунар. науч.-техн. конф., Минск, 27–29 мая 2013 г. : в 4 т / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол. : Б.М. Хрусталеv, Ф.А. Романюк, А.С. Калиниченко. – Минск, 2013. – Т.1. – С. 84–85.

29. Романюк, В.Н. Модернизация ТЭЦ энергосистемы в контексте интенсивного энергосбережения / В.Н. Романюк, А.А. Бобич, И.С. Середич // Наука – образованию, производству экономике : материалы 12-й междунар. науч.-техн. конф., Минск, 25–27 мая 2014 г. : в 4 т / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол. : Б.М. Хрусталеv, Ф.А. Романюк, А.С. Калиниченко. – Минск, 2014. – Т.1. – С. 98.

30. Бобич, А.А. Изменения в составе основного оборудования на ТЭЦ при переходе на парогазовую технологию / А.А. Бобич // Современные научно-технические проблемы теплоэнергетики. Пути решения : сб. науч. тр. по материалам XII Междунар. науч.-техн. конф. / Саратовск. Гос. ун-т; редкол. : Р.З. Аминов [и др.]. – Саратов, 2014. – С. 55–58.

31. Бобич, А.А. Интенсивное энергосбережение на ТЭЦ при переходе на парогазовую технологию / А.А. Бобич // Научные и инновационные проекты и инициативы молодежи Беларуси и Китая «Новые горизонты 2014» : материалы конференции Белорус.-Китайского молодежного

инновационного форума, Минск, 3–4 декабр. 2014 г. / Беларус. нац. техн. ун-т; редкол. : Б.М. Хрусталеv [и др.]. – Минск, 2014. – С. 91–92.

32. Бобич, А.А. Интенсивное энергосбережение на ТЭЦ при переходе на парогазовую технологию / А.А. Бобич // Энерго- и ресурсосбережение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии : материалы Всероссийской науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых с междунар. участием, Екатеринбург, 16–19 декабр. 2014 г. : в 2 т / Уральск. федер. ун-т им. Перв. Президента России Б.Н. Ельцина ; редкол. : Н.И. Данилов. – Екатеринбург, 2015. – Т.1. – С. 63–66.

33. Бобич, А.А. Изменения в составе основного оборудования на ТЭЦ при переходе на парогазовую технологию / А.А. Бобич // Форум проектов программ Союзного государства. IV форум вузов инженерно-технолог. профиля: сб. материалов форума, 9–14 ноябр. 2015 г. : / Беларус. нац. техн. ун-т; редкол. : Б.М. Хрусталеv [и др.]. – Минск, 2015. – С. 10–14.

34. Бобич, А.А. Интенсивное энергосбережение на ТЭЦ / А.А. Бобич, В.Н. Романюк // Теплоэнергетика. Энергия – 2015 : материалы Десятой междунар. науч.-техн. конф. студ., асп. и молодых ученых, Иваново, 21–23 апр. 2015 г. : в 7 т. / Ивановск. гос. энерг. ун-т; редкол. : В.В. Тютиков [и др.]. – Иваново, 2015. – Т.1. – С. 6–8.

35. Бобич, А.А. Развитие ТЭЦ в современных условиях / А.А. Бобич // Наука – образованию, производству экономике : материалы 13-й междунар. науч.-техн. конф., Минск, 22 янв. 2015 г. : в 4 т / Беларус. нац. техн. ун-т; редкол. : Б.М. Хрусталеv, Ф.А. Романюк, А.С. Калиниченко. – Минск, 2015. – Т.1. – С. 93–94.

36. Романюк, В.Н. Диверсификация вариантов регулирования мощности генерации Белорусской энергосистемы / В.Н. Романюк, А.А. Бобич, Е.Г. Бойко // Наука – образованию, производству экономике : материалы 14-й междунар. науч.-техн. конф., Минск, 25–27 мая 2016 г. : в 4 т / Беларус. нац. техн. ун-т; редкол. : Б.М. Хрусталеv, Ф.А. Романюк, А.С. Калиниченко. – Минск, 2016. – Т.1. – С. 112–113.

37. Бобич, А.А. Снижение удельного расхода топлива на выработку электроэнергии на ТЭЦ / А.А. Бобич, В.Н. Романюк // Теплоэнергетика. Энергия – 2017 : материалы Двенадцатой междунар. науч.-техн. конф. студ., асп. и молодых ученых, Иваново, 04–06 апр. 2017 г. : в 6 т. / Ивановск. гос. энерг. ун-т; редкол. : В.В. Тютиков [и др.]. – Иваново, 2017. – Т.1. – С. 8–9.



РЭЗІЮМЭ

Бобіч Аляксандр Аляксандравіч

Комплекс энергазберагальных мерапрыемстваў на ЦЭЦ пры адаптацыі да ўмоў працы энергасістэмы з уводам Беларускай АЭС

Ключавыя словы: комплекс энергазберагальных мерапрыемстваў, ЦЭЦ, энергасістэма, АЭС, тэрмадынамічная эфектыўнасць, эксэргетычны ККД, парагазавая ўстаноўка, ГТУ, скідным схема, АБХМ, АБТН, цеплавы акумулятар, рэгрэсійная залежнасць, матэматычная мадэль, эканомія паліва.

Мэта работы – распрацаваць комплекс энергазберагальных мерапрыемстваў на ЦЭЦ пры адаптацыі да ўмоў працы энергасістэмы з уводам Беларускай АЭС, якія дазваляюць у сукупнасці павысіць эфектыўнасць выкарыстання прыроднага газу на ЦЭЦ і ў энергасістэме.

Метады даследавання. Матэматычнае мадэляванне і колькаснае эксперыментальнае даследаванне на базе планавання і апрацоўкі эксперыменту, эксэргетычны метады тэрмадынамічнага аналізу.

Атрыманыя вынікі і іх навізна. Распрацавана метадыка разліку тэрмадынамічнай эфектыўнасці рэгіянальнай энергасістэмы на аснове індэкаўнага крытэрыя – эксэргетычнага ККД, якая дазваляе атрымліваць колькасныя значэнні тэрмадынамічнай эфектыўнасці энергасістэмы ад укаранення энергазберагальных мерапрыемстваў. Распрацавана новая структурная схема ЦЭЦ з паралельнымі сувязямі па інтэграцыі высокатэмпературнай надбудовы ГТУ па скіднай схеме. Атрыманы новыя тэарэтычныя дадзеныя, якія адлюстроўваюць ўмовы эфектыўнага прымянення АБХМ для астуджэння паветра перад кампрэсарам ГТУ парогазавых устаноў на ЦЭЦ у міжацяпляльны перыяд для кліматычных умоў Беларусі. Распрацавана матэматычная мадэль цеплавой схемы ЦЭЦ з паралельнымі сувязямі і АБТН для ўтылізацыі нізкатэмпературных цеплавых патокаў сістэм цыркуляцыйнага астуджэння і атрыманы новыя дадзеныя, якія адлюстроўваюць ўмовы эфектыўнага прымянення АБТН. Атрыманы рэгрэсійныя залежнасці для вызначэння электрычнага ККД і ўдзельнай выпрацоўкі электраэнергіі. Распрацаваны комплекс энергазберагальных мерапрыемстваў для развіцця цеплавых схем ЦЭЦ ва ўмовах энергасістэмы Беларусі, які ўключае: прымяненне ГТУ па скіднай схеме, прымяненне АБХМ і АБТН, што дазваляе павысіць эфектыўнасць выкарыстання прыроднага газу на ЦЭЦ з паралельнымі сувязямі і забяспечыць гадавую эканомію прыроднага газу ў энергасістэме Беларусі да 0,74 млн т у. т.

Рэкамендацыі па выкарыстанні. Вынікі працы выкарыстаны ў РУП «БЕЛЦЭ» і ў навучальным працэсе.

Галіна выкарыстання: ЦЭЦ энергасістэмы Беларусі.

РЕЗЮМЕ

Бобич Александр Александрович

Комплекс энергосберегающих мероприятий на ТЭЦ при адаптации к условиям работы энергосистемы с вводом Белорусской АЭС

Ключевые слова: комплекс энергосберегающих мероприятий, ТЭЦ, энергосистема, АЭС, термодинамическая эффективность, эксергетический КПД, парогазовая установка, ГТУ, сбросная схема, АБХМ, АБТН, регрессионная зависимость, математическая модель, экономия топлива.

Цель работы – разработать комплекс энергосберегающих мероприятий на ТЭЦ при адаптации к условиям работы энергосистемы с вводом Белорусской АЭС, позволяющих в совокупности повысить эффективность использования природного газа на ТЭЦ и в энергосистеме.

Методы исследования. Математическое моделирование и численное экспериментальное исследование на базе планирования и обработки эксперимента, эксергетический метод термодинамического анализа.

Полученные результаты и их новизна. Разработана методика расчета термодинамической эффективности региональной энергосистемы на основе индикативного критерия – эксергетического КПД, позволяющая получать количественные значения термодинамической эффективности энергосистемы от внедрения энергосберегающих мероприятий. Разработана новая структурная схема ТЭЦ с параллельными связями по интеграции высокотемпературной надстройки ГТУ по сбросной схеме. Получены новые теоретические данные, отражающие условия эффективного применения АБХМ для охлаждения воздуха перед компрессором ГТУ парогазовых установок на ТЭЦ в межтопительный период для климатических условий Беларуси. Разработана математическая модель тепловой схемы ТЭЦ с параллельными связями и АБТН для утилизации низкотемпературных тепловых потоков систем циркуляционного охлаждения и получены новые данные, отражающие условия эффективного применения АБТН. Получены регрессионные зависимости для определения электрического КПД и удельной выработки электроэнергии. Разработан комплекс энергосберегающих мероприятий для развития тепловых схем ТЭЦ в условиях энергосистемы Беларуси, включающий: применение ГТУ по сбросной схеме, применение АБХМ и АБТН, что позволяет повысить эффективность использования природного газа на ТЭЦ с параллельными связями и обеспечить годовую экономию природного газа в энергосистеме Беларуси до 0,74 млн т у. т.

Рекомендации по использованию. Результаты работы использованы в РУП «БЕЛТЭИ» и в учебном процессе.

Область применения: ТЭЦ энергосистемы Беларуси.

SUMMARY

Bobich Aliaksandr Aliaksandrovich

Complex of energy-saving measures at the CHP when adapting to the operating conditions of the energy system due to commissioning of the Belarusian NPP

Keywords: Complex of energy-saving measures, CHP, energy system, NPP, thermodynamic efficiency, exergy efficiency, combined-cycle plant, GTU, discharge P&I diagram, absorption chiller (ABCM), absorption heat pump, (ABHP), regression dependence, mathematical model, the system fuel economy.

Objective: To develop a complex of energy-saving measures at the CHP when adapting to the operating conditions of the energy system due to the commissioning of the Belarusian NPP, what all together allows to increase the efficiency of natural gas use at the CHP and in the energy system.

Research Methods. Mathematical modeling and numerical experimental investigation on the basis of the planning and processing of experiment, exergy method of thermodynamic analysis.

Obtained results and their novelty. A methodology for calculating the thermodynamic efficiency of a regional power system based on an indicative criterion - an exergy efficiency was developed. What allowed to obtain quantitative values of the thermodynamic efficiency of the energy system from the introduction of energy saving measures. A new structural scheme of a combined heat and power plant with parallel connections for the integration of combined cycle based on high-temperature gas turbine with a discharge P&I diagram was developed. New theoretical data that reflect the conditions for the effective use of ABCM for air cooling in front of the GTU compressor at the CHP plant during the non-heating period for the climatic conditions of Belarus was obtained. A mathematical model of the P&I diagram of CHP with parallel connections and ABHP for the utilization of low-temperature heat flows of circulating cooling systems has been developed and new data have been obtained that reflect the conditions for the effective use of ABHP. Regression dependences was obtained to determine the electrical efficiency and the specific output of electricity. A set of energy-saving measures was established for the development of P&I diagram of CHP in the conditions of the Belarusian energy system, including: circuit solutions for the use GTU in the discharge scheme, the use of ABCM and ABHP, which makes it possible to increase the efficiency of natural gas use at CHP with parallel connections and to ensure an annual saving of natural gas in the Belarusian energy system to 0.74 million toe.

Recommendations for use. Results of the work were used in RUE «BELTEI» and in the learning process.

Application field: CHP of Belarussian power system.

Научное издание

БОБИЧ

Александр Александрович

**КОМПЛЕКС ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ МЕРОПРИЯТИЙ НА ТЭЦ
ПРИ АДАПТАЦИИ К УСЛОВИЯМ РАБОТЫ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ
С ВВОДОМ БЕЛОРУССКОЙ АЭС**

Автореферат диссертации

на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.14.14 – Тепловые электрические станции,
их энергетические системы и агрегаты

Подписано в печать 02.03.2018. Формат 60x84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 1,86. Уч.-изд. л. 1,45. Тираж 120. Заказ 212.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.