

На правах рукописи



Батухтин Андрей Геннадьевич

«Комплексное совершенствование технологий тепловой и нетрадиционной
энергетики для повышения эффективности систем централизованного
теплоснабжения (на примере Забайкальского края)»

Специальность 05.14.01 – Энергетические системы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Иркутск – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Забайкальский государственный университет» (ФГБОУ ВО «ЗабГУ»)

Научный консультант: доктор технических наук, профессор,
Иванов Сергей Анатольевич

Официальные оппоненты: **Елсуков Владимир Константинович**

доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Братский государственный университет», кафедра энергетики, профессор кафедры

Тюрина Элина Александровна

доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, отдел теплосиловых систем, ведущий научный сотрудник

Штым Константин Анатольевич

доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный федеральный университет», департамент энергетических систем политехнического института, директор

Ведущая организация: **Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург**

Защита диссертации состоится «07» июня 2022 г. в 09:00 на заседании диссертационного совета Д 003.017.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН), по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, к. 355.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИСЭМ СО РАН по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, к. 407 и на сайте <http://isem.irk.ru/dissert/case/DIS-2022-3/>.

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 003.017.01,
доктор технических наук, профессор



**Клер
Александр Матвеевич**

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Экономика РФ характеризуется повышенной энергоемкостью в сравнении с большинством стран Западной Европы и США. В Энергетической стратегии России на период до 2030 года констатируется, что выполнение целевых показателей снижения энергоемкости ВВП на 40 % к уровню 2007 года, заложенных в ФЗ № 261 «Об энергосбережении...» и соответствующей ему «Государственной программе по энергосбережению и повышению энергоэффективности до 2020 года», достигнуто не за счет фактического энергосбережения, а за счет роста мировых цен на экспортируемые топливно-энергетические ресурсы и активного развития малозергоемкой сферы услуг. В условиях пандемии коронавируса, приведшей к коллапсу сферы услуг и обвалу цен на энергоносители, данное снижение в значительной мере нивелировано.

Особенности резко континентального климата большей части территории РФ обуславливают значительную составляющую систем теплоснабжения в суммарном потреблении топливно-энергетических ресурсов (около 400 млн т ут/год, 45 % от общего расхода). Вследствие этого достижение реальных показателей энергоэффективности в целом по стране невозможно без повышения эффективности одной из наиболее энергозатратных отраслей народного хозяйства – теплоснабжения, которое формировалось во времена плановой экономики и основывается на паротурбинных ТЭЦ, созданных при государственном финансировании строительства. Их функционирование позволило добиться высокой доли комбинированной выработки тепловой и электрической энергии, что обеспечивало значительную экономию топлива. После распада СССР работа систем централизованного теплоснабжения (далее – СЦТ) показывает заметное ухудшение технико-экономических показателей в результате сокращения промышленного производства, перехода части потребителей на собственные источники, а также роста потерь тепловой энергии при транспорте теплоносителя. В то же время отсутствие достаточных ресурсов в период реформирования энергетики обусловило значительный износ производственных фондов, в особенности в тепловых сетях, что привело в совокупности с неоптимальностью работы к ограничению располагаемой мощности СЦТ. Это может послужить причиной срыва государственных программ обеспечения населения доступным жильем и развития строительной отрасли.

Принятие в 2019 г. Еврокомиссией «Зеленого пакта» трансформировало в мировые, тенденции учета и торговли квотами за выбросы CO₂. Введение трансграничного углеродного регулирования посредством пошлин, зависящих от объема углеродного следа конкретной продукции, требует новых подходов к выбору источников энергии. Принятие РФ Парижского соглашения, новые федеральные законы и позиция руководства страны определяют необходимость перехода к низкоуглеродной энергетике путем поэтапного сокращения использования традиционных видов топлива. Современные вызовы мировой потребности декарбонизации требуют от энергетической отрасли РФ глобального энергоперехода, и если для электроэнергетики уже определены основные технологии (атомная и гидроэнергетика), то в системах

теплоснабжения нет однозначных решений. С одной стороны, существующие системы обладают высоким потенциалом энергосбережения, а с другой – развитая теплофикация сама является технологией, обеспечивающей снижение потребления топлива и, как следствие, снижение эмиссии CO₂. Перевод генерации электроэнергии от ТЭЦ на источники с нулевыми выбросами CO₂ (с учетом их реальных режимов работы) не даст ощутимого снижения эмиссии парниковых газов, что требует новых технологических решений.

В настоящее время наибольшим потенциалом энергоэффективности и, как следствие, декарбонизации в теплоснабжении обладают технологии использования нетрадиционных источников энергии (далее – НИЭ), включающие возобновляемые источники энергии (далее – ВИЭ) и вторичные энергетические ресурсы (далее – ВЭР). Поскольку теплофикация признана (в том числе в странах Евросоюза, США и Китае) одним из наиболее рациональных способов энергосбережения на ТЭС, то использование НИЭ в СЦТ, приводящие к снижению эффективности теплофикации, должно быть рационализировано и теоретически обосновано. Малозатратные методы повышения эффективности СЦТ, с учетом их состояния, также следует отнести к наиболее рациональным, и внедрение их с технологиями использования ВИЭ должно осуществляться в комплексе. Перспективы трансграничного углеродного регулирования определяют особую актуальность таких технологий. При этом использование НИЭ в СЦТ сопряжено с рядом сложностей, обусловленных как высокой температурой теплоносителя, так и особенностью технологии теплофикации, что требует совершенствования существующих технологий. Таким образом, разработка способов использования НИЭ в комплексе с малозатратными методами в СЦТ является одним из направлений повышения энергоэффективности систем теплоснабжения РФ и соответствует основам государственной политики в области экологического развития на период до 2030 года в разделе решения задачи развития экономического регулирования и рыночных инструментов охраны окружающей среды.

Степень научной разработанности темы. Значительный вклад в формирование теплофикационных систем, а также в развитие методов повышения эффективности их функционирования, в том числе схемных и режимных методов использования ВЭР, внесли работы советских и российских ученых и специалистов: Л. Л. Гинлера, Л. А. Мелентьева, Е. Я. Соколова, Е. Ф. Бродянского, Е. П. Шубина, В. Я. Хасилева, А. П. Меренкова, Л. С. Попырина, В. Я. Стенникова, А. И. Андрющенко, Л. С. Хрилёва, В. М. Боровкова, Ю. М. Хлебалина, Н. М. Зингера, Е. И. Бенесона, Д. М. Будянского, А. А. Мадояна, А. М. Клера, И. А. Смирнова, Н. Н. Новицкого, В. И. Шаропова, Б. Н. Громова и др., а также коллективов ИСЭМ СО РАН, ИТФ СО РАН, ОРГРЭС, ЦКТИ, ВТИ, ЭНИН, УТМЗ, ЛМЗ и др.

К наиболее перспективным технологиям использования ВИЭ в системах теплоснабжения следует отнести применение солнечных коллекторов (далее – СК) и тепловых насосов (далее – ТНУ). Значительный вклад в развитие данных технологий для СЦТ внесли такие отечественные и зарубежные ученые, как В. П. Вейнберг, Д. Л. Догадин, Б. К. Бодашков, Н. Н. Ефимов, М. В. Кирпичев,

К. Г. Трофимов, И. Н. Крынкин, В. А. Баум, И. А. Лапин, О. С. Попель, Г. Г. Латыпов, С. И. Смирнов, Г. А. Гухман, В. А. Бутузов, В. И. Виссарионов, А. П. Плевако, Р. А. Амерханов, А. С. Штым, М. Е. Орлов, В. Е. Шарапов, С. В. Скубиенко, И. В. Янченко, L. Kelvin, P. Rittinger, A. Stodola, J. Sumner, R. C. Webber, M. D. Rabinovich, A. Fert, V. F. Gershkovich, N. Harchenko, R. Averzov, S. Banse, J. Berner, R. Bajran, N. V. Meladze и др.

Также к методам использования ВЭР в комплексе «ТЭС-потребитель» следует отнести использование теплоты уходящих газов котельных агрегатов (далее – КА). Использование данной теплоты, особенно у котлов, работающих на угле, сопряжено с необходимостью подавления оксидов серы и азота. Высокие показатели загрязненности атмосферного воздуха населенных пунктов России вредными выбросами не позволяют рассматривать вопросы развития угольных СЦТ без учета их экологического воздействия. Развитие теории и практики методов повышения экологической эффективности КА теплоэнергетических систем определили отечественные и зарубежные ученые: Е. М. Балабаева, В. Р. Котлер, С. Е. Белик, А. Н. Тугов, П. В. Росляков, И. Я. Сигал, И. Н. Шмиголь, И. Л. Ионкин, Г. Б. Манелис, И. О. Крылов, Ю. П. Блазнин, А. А. Строков, Э. А. Тюрина, Ц. Ц. Дамбиев, К. А. Штым, A. Rigby, S. Khan, J. Javris, N. Soud и др.

Отмечая достижения ранее выполненных работ, следует сказать, что в настоящее время необходимо решать новые задачи совершенствования СЦТ. Выполнение требований глобального энергоперехода для СЦТ РФ невозможно без разработки, обоснования и внедрения наиболее рациональных способов достижения фактической экономии топливно-энергетических ресурсов за счет комплексного совершенствования технологий тепловой и нетрадиционной энергетики во всех элементах комплекса «ТЭС – тепловая сеть – потребитель тепловой энергии». Комплексное исследование, направленное на решение этой задачи, должно сочетать методы математического моделирования, экспериментального и опытно-промышленного обоснования.

Актуальность данной работы подтверждается также тем, что она соответствует одному из приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в РФ: «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика», а тематика работы попадает под три пункта критических технологий РФ: «Технологии энергоэффективного производства и преобразования энергии на органическом топливе», «Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии» и «Технологии новых и возобновляемых источников энергии, включая водородную энергетику» (утв. Президентом РФ 07.07.2011 г. № 899).

Объектом исследования в настоящей работе является комплекс взаимосвязанных элементов СЦТ на базе угольных ТЭС.

Предмет исследования – совершенствование технологий тепловой и нетрадиционной энергетики в СЦТ.

Целью диссертационной работы является решение комплексной научной проблемы развития региональной энергетики путем разработки взаимосвязанных методических подходов, теоретических положений, математических моделей, направленных на комплексное совершенствование

технологий тепловой и нетрадиционной энергетики в СЦТ.

В работе поставлены и решены следующие основные задачи:

- разработка технологических рекомендаций по совершенствованию существующих СЦТ за счет использования НИЭ;
- совершенствование технологий использования СК и ТНУ для развития СЦТ;
- разработка малозатратных способов энергосбережения в тепловых схемах ТЭС и при отпуске тепловой энергии в СЦТ;
- разработка и рационализация способов снижения вредных газовых выбросов от объектов теплоэнергетики;
- технико-экономическое обоснование и апробация использования СК и ТНУ, а также малозатратных способов энергосбережения в тепловых схемах ТЭС и при отпуске тепловой энергии в СЦТ;
- апробация технико-экономически обоснованных (за счет использования ВЭР) способов снижения вредных газовых выбросов от объектов теплоэнергетики.

Научная новизна. В работе получены новые научные результаты:

Теоретического характера:

1. Обоснована рациональность комплексного совершенствования технологий тепловой и нетрадиционной энергетики для повышения эффективности СЦТ.

2. Расчетными и экспериментальными исследованиями впервые доказана эффективность совмещения нагрева в одном СК двух видов теплоносителей (воды и воздуха).

3. Впервые теоретически и экспериментально обосновано для условий межотопительного периода использование отопительных систем в качестве источника теплоты для нужд горячего водоснабжения (далее – ГВС) и при кондиционировании.

4. На основе аналитического решения n-мерной системы рекуррентно связанных дифференциальных уравнений разработана математическая модель температурного запаздывания в СЦТ, учитывающая теплоаккумулирующие свойства тепловых сетей и потребителей тепловой энергии.

5. Предложен комплексный подход к использованию ВЭР в СЦТ за счет рационализации функционирования системы, включающий оптимизацию годовых и суточных графиков центрального регулирования, а также модернизацию самих систем и их элементов.

6. Разработана методика комплексной оптимизации режимов работы ТЭС в современных условиях её функционирования на оптовом рынке электроэнергии и мощности (далее – ОРЭМ).

7. Разработаны математические модели и алгоритмы функционирования теплопотребляющих установок, использующих ВИЭ:

- отопительных систем потребителей, осуществляющих кондиционирование и являющихся источником теплоты для нужд ГВС в СЦТ;
- систем использования СК в СЦТ;
- систем гелиовоздушного отопления;
- систем предварительного нагрева воздуха КА за счет использования

энергии Солнца.

8. Разработана система критериев оптимизации мероприятий по совершенствованию СЦТ, дифференцированных по условиям различных экономических отношений.

Прикладного характера:

1. Разработано методическое обеспечение использования НИЭ для развития СЦТ путем:

- совершенствования потокораспределения в тепловых схемах ТЭС;
- использования ТНУ и электронных систем автоматического регулирования отпуска тепловой энергии (далее – САР) в тепловых сетях и у потребителей;

- использования солнечной энергии в системах теплоснабжения;
- использования солнечной энергии для предварительного нагрева воздуха КА ТЭС.

2. Разработаны комбинированные способы совместного снижения выбросов SO_x и NO_x от КА ТЭС, обеспечивающие повышение их энергетической эффективности.

3. Научная новизна прикладного характера подтверждается соответствующими объектами интеллектуальной собственности.

Практическая ценность работы определяется тем, что:

1. Разработаны высокоэффективные методы модернизации систем теплоснабжения потребителей тепловой энергии за счет использования ВИЭ в СЦТ.

2. Разработаны энергоэффективные методики повышения эффективности функционирования СЦТ за счет использования ТНУ и современных САР.

3. Разработанные методики оптимизации годовых и суточных графиков отпуска тепловой энергии могут использоваться при разработке рациональных режимов центрального регулирования в СЦТ. Системный подход к оптимизации функционирования СЦТ, сформированный на их основе, позволяет осуществлять комплексное повышение эффективности отпуска теплоты от ТЭС.

4. Алгоритм и методика комплексной оптимизации режимов работы ТЭС в условиях её функционирования на ОРЭМ, реализованные в комплексе программ для ЭВМ, позволяющие, используя возможности современных вычислительных систем, рационализировать финансовый результат с учетом оперативного перераспределения тепловой и электрической энергии между турбоагрегатами (далее – ТА):

- при выборе состава включённого генерирующего оборудования;
- при определении оптимальной загрузки ТЭС на рынке на сутки вперед (далее – РСВ) и формировании оптимальных ценовых заявок;
- при поставке электроэнергии на балансирующий рынок (далее – БР).

5. Предложены методы повышения эффективности и увеличения располагаемой мощности СЦТ за счет совершенствования потокораспределения в тепловых схемах ТЭС, обладающие высоким потенциалом энергосбережения.

6. Разработаны комбинированные способы совместного снижения

выбросов SO_x и NO_x , обеспечивающие одновременное повышение эффективности использования топлива в КА ТЭС на 0,56%. Удельная стоимость сокращения выбросов при их использовании значительно ниже лучших мировых аналогов.

Реализация работы:

1. Фактический эффект от внедрения только условно «беззатратных» (режимных) мероприятий на объектах энергетики Забайкальского края составил более 70 млн руб/год.

2. Внедрение предложенных способов совершенствования потокораспределения в тепловых схемах на ХарГРЭС показало фактический эффект более 8 млн руб/год.

3. Внедрение предложенных способов повышения эффективности функционирования СЦТ за счет использования ТНУ и современных САР в г. Чите показало фактический эффект более 3 млн руб. за отопительный период.

4. Опыт эксплуатации модернизированных систем теплоснабжения потребителей тепловой энергии за счет использования ВИЭ показал их высокую экономичность и минимальные сроки окупаемости, что обуславливает их широкое внедрение. Для вовлечения в хозяйственный оборот с участием ФГБОУ ВО «ЗабГУ» было открыто малое инновационное предприятие с годовым оборотом более 7 млн руб/год.

5. Результаты исследования нашли применение при разработке схем теплоснабжения, программ энергосбережения и программ приведения объемов вредных выбросов от КА к уровню европейских стандартов для основных СЦТ Забайкальского края.

6. На основании результатов исследований, выполненных в рамках диссертационной работы, разработаны авторские курсы лекций, комплексы практических работ и учебные пособия для бакалавров и магистров, обучающихся по направлениям 13.03.01 и 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника».

Методология и методы исследования. Работа базируется на методологии системных исследований в энергетике, использованы методы математического моделирования теплоэнергетических установок и комплексов, аналитические исследования, в том числе с применением распределенных вычислительных систем, лабораторные и промышленные экспериментальные исследования, методы статистики.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности 05.14.01 – Энергетические системы и комплексы, подтверждается научной и практической новизной исследований по всем шести пунктам области исследования.

Связь работы с научными программами, планами, темами, грантами. Направление работы определено в соответствии с Энергетической стратегией России на период до 2030 года. Основные разделы работы выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ и Правительства Забайкальского края: по гранту Президента РФ МК-2780.2012.8 на 2012–2013 гг. и МК-1184.2014.8 на 2014–2015 гг.; в рамках

Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. (ГК № 02.740.11.0028, ГК № 14.В37.21.0342, ГК № 14.В37.21.0311); по госбюджетной теме ЗабГУ (ЗабГУ ГБ № 1.3.12); по программе выполнения научных исследований и разработок по приоритетным направлениям в интересах экономики Забайкальского края в 2008–2009 гг. (ГК № 62/08); в рамках краевой научно-технической программы «Энергосбережение на предприятиях Забайкальского края» на 2005–2015 гг.

Достоверность и обоснованность результатов исследования и технологических рекомендаций базируется на основных положениях системного анализа в энергетике, термодинамики и тепломассообмена, с использованием современных методов математического моделирования, обеспечивается высокой степенью сходимости результатов моделирования с лабораторными и опытно-промышленными испытаниями, а также положительным опытом эксплуатации предлагаемых режимных методов и способов модернизации СЦТ.

На защиту выносятся следующие положения:

– развитие СЦТ за счет использования энергии Солнца достигается посредством внедрения высокоэффективных систем нагрева сетевой воды и водовоздушных СК;

– использование ТНУ для развития СЦТ может быть технико-экономически обосновано при использовании в качестве низкопотенциального источника отопительных систем потребителей;

– повышение эффективности и увеличение располагаемой мощности СЦТ достигается совершенствованием тепловых схем и оптимизацией режимов работы ТА ТЭС в современных условиях их функционирования на ОРЭМ;

– комплексное совершенствование СЦТ достигается за счет оптимизации их функционирования, включающей рационализацию годовых и суточных графиков центрального регулирования, и внедрения малозатратных способов энергосбережения;

– повышение экономической эффективности и экологической безопасности действующих ТЭС обеспечивается на базе разработки и внедрения комбинированных способов совместного снижения выбросов SO_x и NO_x за счет использования цеолитсодержащих пород.

Личный вклад автора заключается в постановке решаемой проблемы, цели и задач исследования; научные результаты и положения, выносимые на защиту, получены автором лично, часть исследований осуществлена под его руководством или с непосредственным участием; также автор осуществлял лабораторные и опытно-промышленные испытания, математическое моделирование, разработку и оценку эффективности эксплуатации предлагаемых режимных методов и способов модернизации СЦТ.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы были доложены и обсуждены на международных конференциях, симпозиумах и конгрессах: «Энергетика в глобальном мире», СФУ (г. Красноярск, 2010); «Энергетика России в XXI веке: стратегия развития – восточный вектор», ИСЭМ СО РАН (г. Иркутск, 2010); «ИНТЕР РАО ЕЭС: решения в области инноваций, энергосбережения и повышения энергоэффективности», ИНТЕР

РАО ЕЭС (г. Москва, 2012); «Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве ВИЭСХ» (г. Москва, 2014); «Электроэнергетика глазами молодежи – 2014», ТПП (г. Томск, 2014); «Энергосбережение и повышение энергоэффективности: от теории к практике», ТГУ (г. Томск, 2014); «Плазменная эмиссионная электроника», БНЦ СО РАН (г. Улан-Удэ, 2015); International Ural Conference on Green Energy (г. Челябинск, 2018); «Инновационные технологии в технике и образовании», ЗабГУ (г. Чита, 2014–2018); «Энергетические системы», БГТУ (г. Белгород, 2018, 2019); «Кулагинские чтения», ЗабГУ (г. Чита, 2004–2021).

На всероссийских и региональных научно-практических конференциях: «Реформирование жилищно-коммунального хозяйства» (г. Чита, 2002); «Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов», АГУ (г. Благовещенск, 2003, 2005); «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук», МФТИ (г. Москва, 2009); «Энерго- и ресурсосбережение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии», УГТУ-УПИ (г. Екатеринбург, 2008, 2010); «Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири» ИрГТУ (г. Иркутск, 2003, 2005, 2010); «Всероссийская конференция молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям», ИСЭМ СО РАН (г. Иркутск, 2010); «Фундаментальные исследования и инновации в технических университетах», СПбГПУ (г. Санкт-Петербург, 2010); «Энергетика: экология, надежность, безопасность», ТПУ (г. Томск, 2010, 2011, 2012); «Пути совершенствования работы теплоэнергетических устройств», ДВФУ (г. Владивосток, 2012); «Безопасность – 2013», ИрГТУ (г. Иркутск, 2013); «Энергетика: эффективность, надежность, безопасность», ТПУ (г. Томск, 2013); «Электроэнергетика байкальского региона: проблемы и перспективы», БНЦ СО РАН (г. Улан-Удэ, 2016); «Экология водоемов – охладителей энергетических станций», ЗабГУ (г. Чита, 2017); «Наземные транспортно-технологические средства: проектирование, производство, эксплуатация», ЗабГУ (г. Чита, 2018); «Современные тренды развития науки» (г. Нижний Новгород, 2018); «Энергетика в современном мире», ЗабГУ (г. Чита, 2003–2019); «Наука и образование: актуальные исследования и разработки», ЗабГУ (г. Чита, 2018–2020); «Безопасность», ЗабГУ (г. Чита, 2020, 2021).

На зарубежных научных конференциях: “ХҮРЭЛ ТОГООТ-2011” (г. Улан-Батор, 2011); “The Development of Science in the 21st Century: Natural and Technical Sciences Ron Bee & Associates Company” (New York, 2015); “The Fifth International Conference on Eurasian Scientific Development” (Vienna, 2015); “The International Symposium on Coal Combustion” (Beijing, 2015, 2019); “International Scientific Forum on Sustainable Development and Innovation” (Patras, 2021).

Публикации. Основные результаты диссертационных исследований опубликованы в 201 работе, в т. ч. в 10 монографиях, 5 учебных пособиях, 50 статьях в научных изданиях, рекомендованных ВАК, 12 статьях, индексированных в базах Web of Science и Scopus, 21 объекте интеллектуальной собственности.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы, включающего 493 источника, и двух

приложений. Она изложена на 336 с. текста и 2 с. приложений, имеет 75 рисунков и 87 таблиц. Общий объем диссертации – 338 с.

Автор выражает благодарность: д-ру техн. наук, профессору С. А. Иванову за консультации при написании работы; техническому руководству ПАО «Территориальная генерирующая компания № 14» (ТГК-14), АО «ИНТЕР РАО – Электрогенерация» – «Харанорская ГРЭС», коллективам ООО «НОЦ Энергия», ООО «УНЦ ТЭС» и ООО «НОЦ НиВИЭ» за помощь в проведении экспериментов, опытно-промышленной апробации и содействии во внедрении результатов исследований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, определена научная новизна, отражена практическая ценность и реализация результатов работы, сформулированы положения, выносимые на защиту, представлены методология и методы исследования, а также структура работы.

В первой главе, носящей обзорный характер, рассмотрено современное состояние проблемы развития СЦТ РФ и существующих методов ее решения. Осуществлена постановка цели, задачи и структуры исследования. Структурная схема работы приведена на рис. 1.

Определено, что для экономически обоснованного развития современных СЦТ РФ необходимы разработка и внедрение наиболее рациональных способов достижения фактической экономии топливно-энергетических ресурсов и развития теплоэнергетической инфраструктуры. В основу этих способов должно быть заложено комплексное совершенствование технологий тепловой и нетрадиционной энергетики. Рассматриваемые способы повышения эффективности должны затрагивать все элементы комплекса «ТЭС – тепловая сеть – потребитель тепловой энергии» и основываться на:

- применении энергии Солнца;
- применении низкопотенциальной теплоты окружающей среды;
- ВЭР в системах теплоснабжения, обусловленных нерациональными режимами работы и схемами функционирования;
- ВЭР в тепловых схемах ТЭС, обусловленных нерациональными режимами работы и схемами функционирования;
- использовании теплоты уходящих газов КА ТЭС.

Климатические условия резко континентального климата определяют использование энергии Солнца как приоритетного НИЭ. **Вторая глава** посвящена ряду внедренных и находящихся на стадии внедрения методов использования в СЦТ возобновляемой энергии Солнца с применением СК.

В районах, характеризующихся резко континентальным климатом, помимо всех положительных, имеется и ряд отрицательных факторов, из-за которых использование СК для ГВС и отопления становится затруднительным. Главный отрицательный фактор, который необходимо учитывать, это низкие температуры в зимнее время. Разность между температурой окружающей среды и температурой коллектора оказывает существенное влияние на эффективность работы последнего. Применение СК в СЦТ характеризуется необходимостью значительного нагрева, что приводит к разности температур между коллектором и наружным воздухом до 150 °С. На рис. 2 представлена схема,

позволяющая при сохранении эффективности нагревать не прямую сетевую воду (как в существующих схемах), а обратную. Кроме того, данная схема позволяет осуществлять использование энергии Солнца как для отопления, так и для ГВС. Алгоритм функционирования системы представлен на рис. 3. Эффективность метода определяется снижением разницы температуры теплоносителя в СК и температуры наружного воздуха на 25...60 °С, а также увеличением времени эффективной работы системы в течение года.

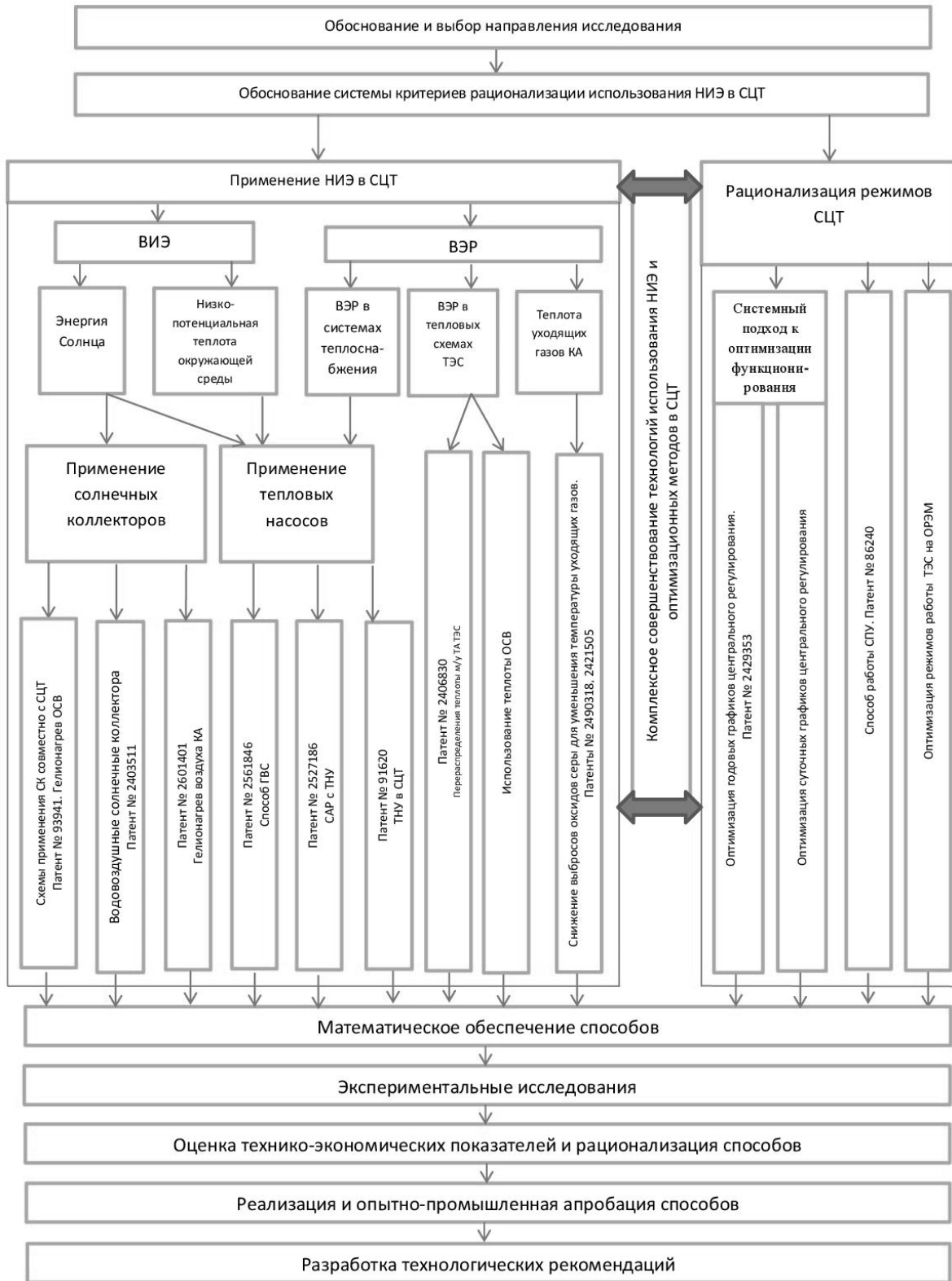


Рисунок 1 – Структурная схема диссертационного исследования

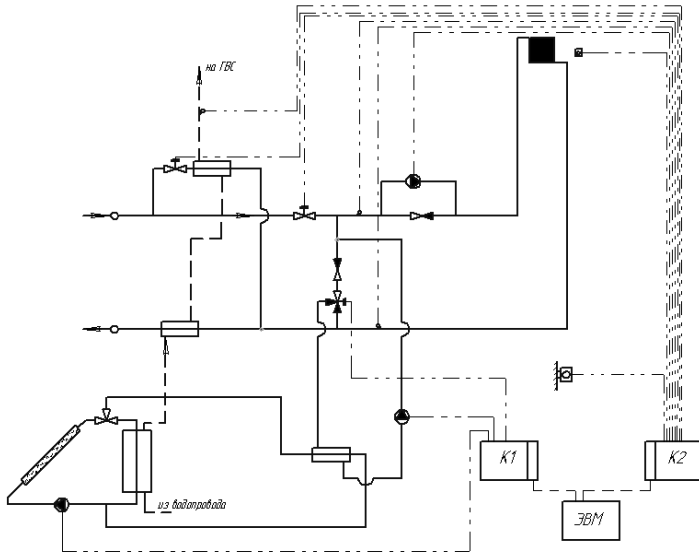


Рисунок 2 – Система геλιοотопления



Рисунок 3 – Алгоритм работы системы гелиоагрева (рис. 2):
 τ_{01} – температуры до СОт;
 τ_{02} – температуры после СОт; G_3 – расход в СОт;
 $t_{\text{СК}}$ – температуры в СК;
 t_B – температура в баке-аккумуляторе

Другим способом повышения эффективности применения СК в СЦТ является использование геλιοвоздушного отопления. В работе расчетными и экспериментальными методами впервые доказана эффективность совмещения нагрева в одном СК двух видов теплоносителей (воды и воздуха). Проведенные экспериментальные исследования показали, что значение КПД для водовоздушного коллектора превышает значение водяного на 0,32 %, а воздушного на 20,53 % в среднем за сутки, что определяет значительное повышение среднегодовых показателей работы. Кроме того, показана возможность, в отличие от аналогов, круглогодичного использования таких СК.

Разработана конструкция водовоздушного СК и схема воздушной

системы гелиоотопления (см. рис. 4). Данная схема характеризуется большей эффективностью по сравнению с отдельным нагревом воды и воздуха и позволяет значительно увеличить продолжительность работы СК в течение года. Опытно-промышленная апробация водовоздушных коллекторов (осуществленная на стенде согласно действующим ГОСТам) показала фактический экономический эффект от внедрения предложенных схем 1371 руб/м^2 при сроке окупаемости 5,1 года.

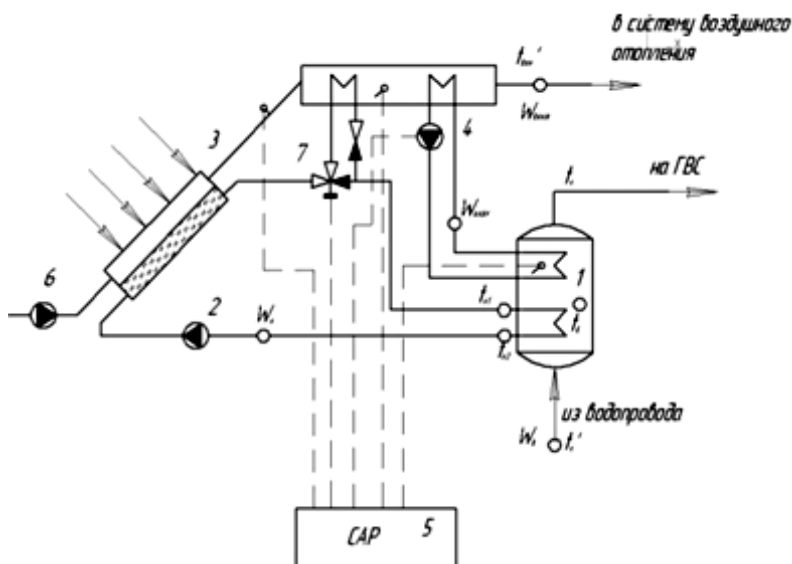


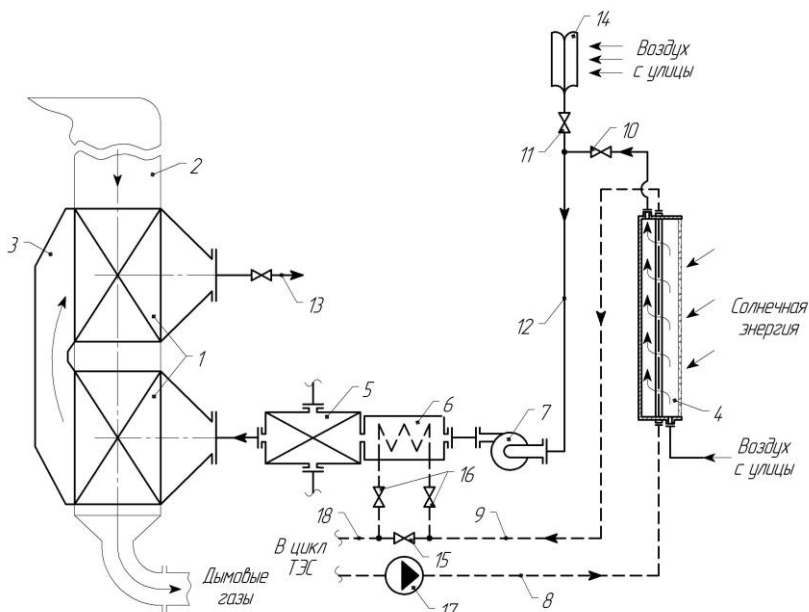
Рисунок 4 – Воздушная система гелиоотопления:

- 1 – бак-аккумулятор;
- 2 – насос гелиоконтура;
- 3 – СК; 4 – калорифер;
- 5 – САР; 6 – вентилятор;
- 7 – трехходовой клапан

Также эффективность совмещения нагрева в одном СК двух видов теплоносителей использована при нагреве воздуха перед КА ТЭС. Схема СК гелионагрева воздуха перед КА представлена на рис. 5. Алгоритм работы схемы представлен на рис. 6. Срок окупаемости схемы гелионагрева первичного воздуха для КА при ее внедрении на Харанорской ГРЭС составил 8 лет. Эффективность метода определяется уменьшением расхода пара для предварительного нагрева воздуха и воды.

Рисунок 5 – Система гелионагрева для КА ТЭС:

- 1 – секция трубчатых теплообменных поверхностей;
- 2 – отводящий газоход;
- 3 – перепускной воздушный короб;
- 4 – солнечный нагреватель;
- 5 – калорифер;
- 6 – теплообменник;
- 7 – дутьевой вентилятор;
- 8, 9 – трубопроводы;
- 10, 11 – шибер;
- 12, 13 – воздуховод;
- 14 – воздухозаборное устройство;
- 15, 16 – запорная арматура;
- 17 – циркуляционный насос;
- 18 – трубопровод отвода воды



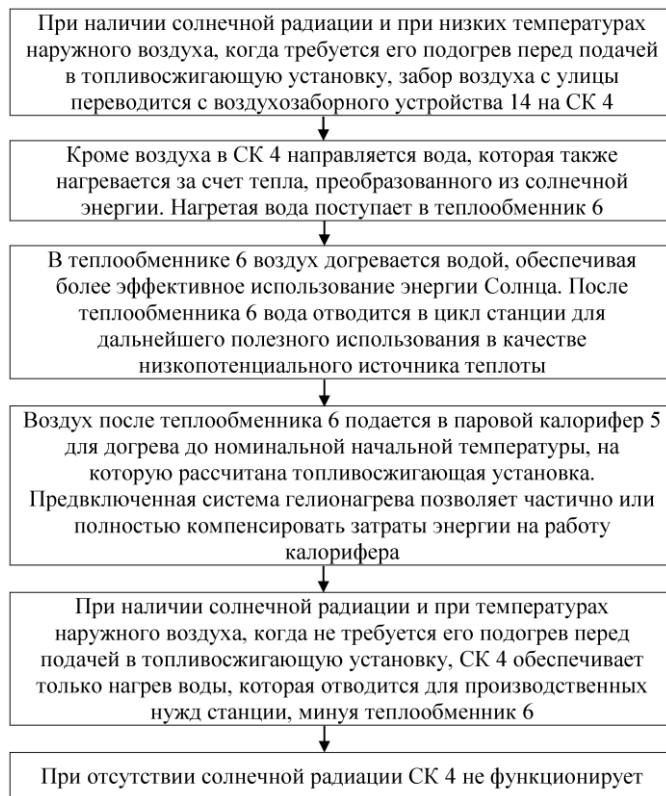


Рисунок 6 – Алгоритм работы СК для нагрева воздуха перед КА (рис. 5)

Помимо энергии Солнца в качестве ВИЭ в СЦТ может использоваться низкопотенциальная теплота окружающей среды. **Третья глава** посвящена ряду внедренных и находящихся на стадии внедрения технико-экономически обоснованных методов использования данной теплоты в СЦТ, основанных на применении тепловых насосов.

Использование ТНУ для замещения нагрузки ГВС является одним из наиболее рациональных подходов к повышению эффективности СЦТ. В отличие от наиболее распространённых радиаторных систем отопления (далее – СОт), системы ГВС характеризуются относительно низкой температурой горячей воды, подготавливаемой для потребителя. Это позволяет сделать вывод, что эффективность работы ТНУ в режиме подготовки воды для нужд ГВС, для большинства СЦТ, будет заведомо выше, чем в условиях замещения отопительной нагрузки. Особый интерес при разработке схем замещения нагрузки ГВС представляет летний режим работы источников теплоснабжения, когда снижается эффективность комбинированной выработки теплоты и электрической энергии и формируются благоприятные условия для перевода ГВС на альтернативный источник. При этом максимальную эффективность разрабатываемые схемы смогут показать только при условии использования доступного возобновляемого источника энергии в качестве низкопотенциального источника теплоты. С учетом описанных особенностей разработан способ замещения нагрузки централизованного ГВС в межотопительный период теплотой от легкодоступного возобновляемого источника энергии. Способ адаптирован к условиям функционирования российских СЦТ и реализуем для любого потребителя, имеющего СОт, без проведения дорогостоящих мероприятий по реконструкции исходной схемы теплоснабжения. В качестве низкопотенциального источника предполагается

использовать СОт, что дополнительно позволит снизить затраты на кондиционирование. На рис. 7 и 8 представлены разработанная система и алгоритм ее функционирования.

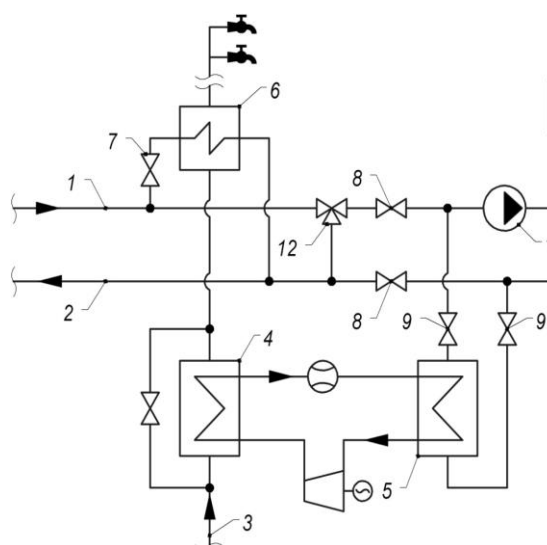


Рисунок 7 – Модернизированная система ГВС:

- 1 – подающий трубопровод;
- 2 – обратный трубопровод;
- 3 – трубопровод воды, идущей на ГВС;
- 4 – конденсатор ТНУ;
- 5 – испаритель ТНУ;
- 6 – теплообменник ГВС;
- 7–9 – запорная арматура;
- 10 – циркуляционный насос;
- 11 – отопительный прибор;
- 12 – трехходовой РР

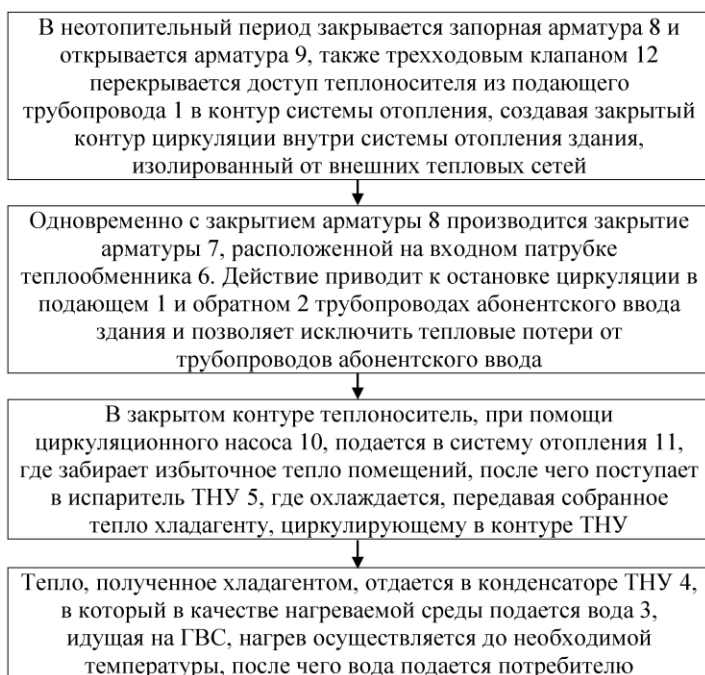


Рисунок 8 – Алгоритм функционирования схемы (рис. 7)

Разработанный способ является концептуальной идеей, которая описывает потенциальную возможность использования СОт потребителя в технологическом цикле ТНУ при подготовке горячей воды и не учитывает особенности функционирования реальных систем теплоснабжения. Для практического воплощения разработки потребуется учесть ограниченность теплового потенциала, организуемого низкопотенциального источника теплоты, суточную неравномерность нагрузки ГВС и отсутствие циркуляционных насосов у большинства потребителей. С учетом концепции также была предложена схема, подходящая для использования с различными типами потребителей (УСК-ГВС) (см. рис. 9). Данная система позволяет создавать стабильные схемы ГВС с использованием ВИЭ.

Алгоритм работы УСК-ГВС с элеватором представлен на рис. 10.

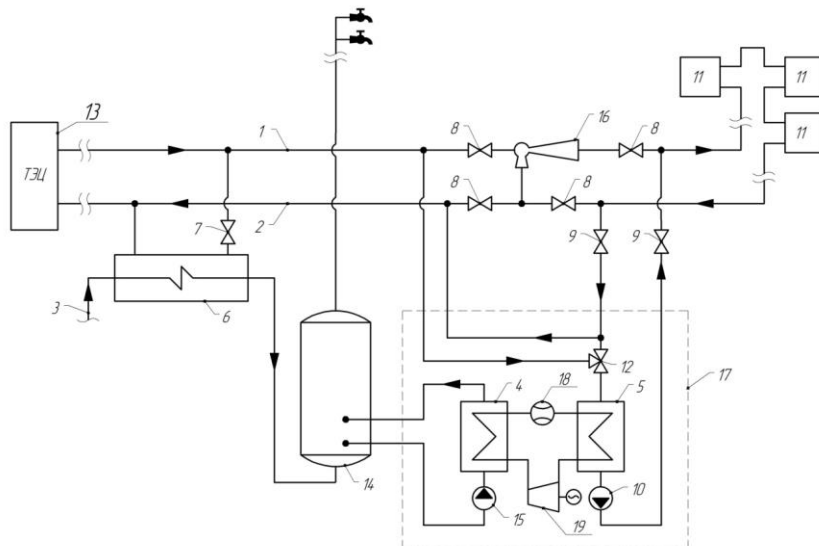


Рисунок 9 –
Принципиальная схема
установки:
1–12 – то же, что и на
рис. 7; 13 – источник
теплоснабжения;
14 – бак-аккумулятор;
15 – цирк. насос бака;
16 – элеватор; 17 – блок
ТНУ; 18 – дроссель;
19 – компрессор

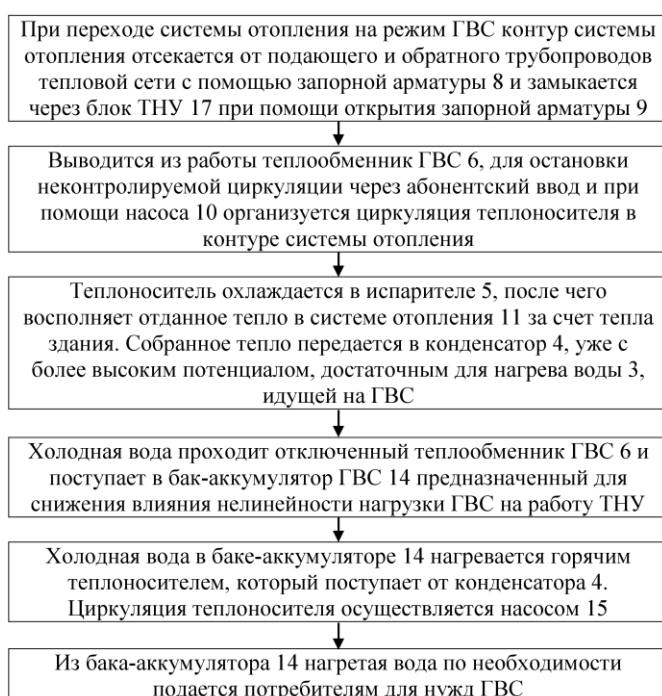


Рисунок 10 – Алгоритм
функционирования УСК-
ГВС (рис. 9)

При обосновании повышение эффективности работы СЦТ с УСК-ГВС было смоделировано изменение температуры внутреннего воздуха здания. Экспериментальная верификация теоретической оценки осуществлялась на опытно-промышленной установке и показала высокую достоверность результатов, получаемых в ходе математического моделирования (расхождение между расчетными и фактическими температурами составило не более $0,25^{\circ}\text{C}$). Также в работе была предложена методика рационализации рабочих параметров циркуляционного насоса в УСК-ГВС по критерию минимума дисконтированных затрат в системе за время реализации проекта.

Работа УСК-ГВС исключительно в межотопительный период снижает потенциальную эффективность ТНУ для СЦТ, поскольку образуются продолжительные периоды простоя оборудования, что оставляет потенциал модернизации данной системы. В зимний период времени предлагается на базе устанавливаемых в УСК-ГВС ТНУ развить технологию дежурного отопления для зданий административного назначения. Дежурное отопление является

одним из подходов к энергосбережению с максимальной эффективностью, и его использование ограничивается только для административных объектов с круглосуточным пребыванием людей, что является основным недостатком дежурного отопления. В случае если круглосуточное пребывание людей в здании организовано только в незначительной его части, применение ТНУ позволит не отказываться от перехода здания в данный режим за счет увеличения функционала разработанной универсальной системы с учетом действия соответствующей САР. При работе дежурного отопления комфортная температура в заданных помещениях будет поддерживаться за счет перекачки теплоты ТНУ, а также повышения теплоотдачи в соответствующих участках СОт. Предложенная универсальная система (для расширения возможностей дежурного отопления) введена в опытно-промышленную эксплуатацию на комплексе зданий энергетического факультета ЗабГУ. Согласно полученным данным разработанная система сокращает издержки на ГВС в 7 раз при сроке окупаемости менее года.

Четвертая глава посвящена малозатратным методам энергосбережения в тепловых схемах ТЭС.

Разработан и реализован способ управления сетевой подогревательной установкой. Сущность метода заключается в том, что совмещение параллельного и последовательного подключения сетевых подогревателей по нагреваемой среде позволяет повысить экономичность ТЭС в течение всего отопительного периода. Расчет эффективности последовательной и параллельной схемы (для условий ХарГРЭС) показал эффективность перехода с базового режима на пиковый при температуре наружного воздуха -15°C . При этом фактический экономический эффект составил более 0,8 млн руб/год. Кроме того, использование способа совмещения параллельной и последовательной схем подключения подогревателей у ТА с регулируемыми отборами пара может в значительной мере увеличить располагаемую мощность СЦТ. Особенно это актуально для ТА с перегруженными по расходу сетевой воды сетевыми подогревателями. Для СЦТ с такими ТА увеличение располагаемой тепловой мощности может достигать 40 %.

Предложен метод увеличения располагаемой тепловой мощности СЦТ за счет перераспределения потоков теплоты между ТА. Эксплуатационные режимы ТЭЦ определяются величиной отпуска как тепловой, так и электрической энергии. Максимизация прибыли генерирующей компании требует формирования таких режимов эксплуатации (при соответствующей ценовой конъюнктуре на ОРЭМ), чтобы объем отпускаемой тепловой и электрической энергии был максимальным. В таких условиях располагаемая тепловая мощность ТЭЦ может быть увеличена за счет перераспределения потоков теплоты между ТА, работающими на разные тепловые сети и покрывающими нагрузку разных групп тепловых потребителей (см. рис. 11).

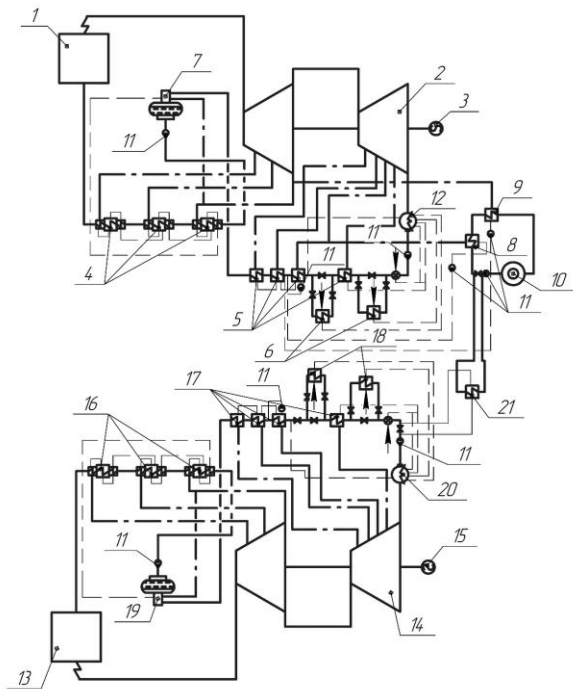


Рисунок 11 – Схема перераспределения потоков теплоты между ТА:

- 1 – КА (I); 2 – ТА ПТ-60 (I); 3 – генератор ТА I; 4 – ПВД ТА I; 5 – ПНД ТА I;
- 6 – пароохладители уплотнений ТА I; 7 – деаэратор ТА I; 8 – СП; 9 – ПСР;
- 10 – СЦТ; 11 – насос; 12 – конденсатор ТА I; 13 – КА (II); 14 – ТА Т-87 (II);
- 15 – генератор ТА II; 16 – ПВД ТА II; 17 – ПНД ТА II; 18 – ОУ ТА II;
- 19 – деаэратор ТА II; 20 – конденсатор ТА II; 21 – водоподогреватель

Схема функционирует за счет дополнительных трубопроводов, врезанных до первого ПНД ТА-II, данные трубопроводы соединяют конденсатор TA-II с трактом сетевой воды TA-I через водоподогреватель. Энергетическая эффективность рассматриваемой схемы определяется значительно более высоким внутренним относительным КПД TA-II по сравнению с TA-I. Рассматриваемая схема экономически оправдана при перераспределении потоков теплоты между ТА типа Т и ПТ при разности в их внутренних относительных КПД цилиндров низкого давления более 18%. Рассмотрена эффективность схемы на примере 2-х ТА ЧитТЭЦ-1, работающих на разные тепловые сети: ПТ-60 (теплосеть ТЭЦ-1 – КСК) и Т-87 (теплосеть ТЭЦ-1 – Город). Суммарный экономический эффект составил: 1,9 млн руб/год при расчетном сроке окупаемости менее года и увеличении располагаемой тепловой мощности до 2%.

Предложена энергоэффективная схема подогрева сырой воды обратной сетевой водой. Фактический результат достигается за счет перераспределения потоков теплоты на нужды ХВО ТА К-215-130 (ХарГРЭС) между нерегулируемыми отборами разного давления. Экономическая эффективность схемы определена следующими показателями: снижение удельного расхода топлива – 0,3 г/кВт·ч (419 т.у.т./год), что определяет экономический эффект 0,89 млн.руб./год при сроке окупаемости 1,5 года.

Разработана схема подготовки воздуха для КА ТЭС в условиях резкоконтинентального климата. Задачей рационализации потокораспределения являлось уменьшение использования наружного воздуха в зимний период при сохранении воздушного баланса КА. Уменьшение использования наружного воздуха предлагается за счет внутреннего, при этом поддержание температуры в котельном цехе будет осуществляться за счет его нагрева в подогревателе, греющим агентом в котором будет сетевая вода, возвращающаяся из СЦТ. Снижение затрат ХарГРЭС на топливо составило

более 5 млн руб/год без учета более полного использования тепла КА и снижения неиспользуемых потерь тепла через обмуровку. Срок окупаемости составил менее месяца.

Также в работе разработана методика рационализации величины отпуска электрической энергии с учетом оптимального распределения тепловой и электрической нагрузки между ТА ТЭЦ в условиях ОРЭМ. Сформулированы критерии оптимизации. Разработаны алгоритм и методика комплексной оптимизации режимов работы ТЭС в современных условиях её функционирования на ОРЭМ, реализованные в комплексе программ для ЭВМ, основанные на декомпозиции расчета тепловой схемы ТЭС, позволяющие, используя возможности современных вычислительных систем, с высокой скоростью находить решение:

– по выбору состава включённого генерирующего оборудования (далее – ВСВГО);

– по определению оптимальной загрузки ТЭЦ на РСВ и формированию оптимальных ценовых заявок;

– по оптимизации финансового результата при оперативном перераспределении тепловой и электрической энергии между ТА и при поставке электроэнергии на БР.

Расчёт ценовой заявки ВСВГО предлагается производить в следующем порядке:

1. Прогноз отпуска тепловой энергии от ТЭЦ на основании многолетних статистических данных о температуре наружного воздуха и прогноза гидрометеоцентра.

2. Определение минимальной $N_{\text{Э}}^{\min \text{ТЭЦ}}$ и максимальной $N_{\text{Э}}^{\max \text{ТЭЦ}}$ электрической мощности ТЭЦ, выработка которой необходима по условиям отпуска тепловой энергии.

3. Прогноз узловых цен на рынке на сутки вперёд $C_{\text{РСВ}}^{\text{план}}$.

4. Итерационный расчёт топливной составляющей себестоимости электрической энергии при изменении мощности ТЭЦ от $N_{\text{Э}}^{\min \text{ТЭЦ}}$ до $N_{\text{Э}}^{\max \text{ТЭЦ}}$ (с учетом оптимизации состава оборудования).

5. Расчёт финансового результата, соответствующего каждому полученному ранее значению топливной составляющей себестоимости электрической энергии. Фиксация максимального и минимального значений финансового результата ТЭЦ, а также финансового результата, соответствующего $N_{\text{Э}}^{\min \text{ТЭЦ}}$ и $N_{\text{Э}}^{\max \text{ТЭЦ}}$, с учетом оптимизации состава оборудования и при постоянном значении тепловой нагрузки ТЭЦ.

Полученные результаты фиксируются в ценовой заявке ВСВГО. При этом весь состав генерирующего оборудования ТЭЦ можно разделить на три категории:

1. Вынужденные по условиям теплоснабжения – ценовая заявка соответствует плановым затратам.

2. Единицы генерирующего оборудования (далее – ЕГО), включённые по оптимизации – ценовая заявка соответствует плановым затратам.

3. ЕГО, включение которых нецелесообразно для ТЭЦ. Ценовая заявка по данным ТА преднамеренно завышается, в связи с чем соответствующие ЕГО не будут отобраны СО по условиям оптимизации.

Разработанный алгоритм позволит определить состав оборудования ТЭЦ, при котором её прибыль на ОРЭМ максимальна.

Алгоритм формирования ценовой заявки ТЭЦ на РСВ представлен на рис. 12.

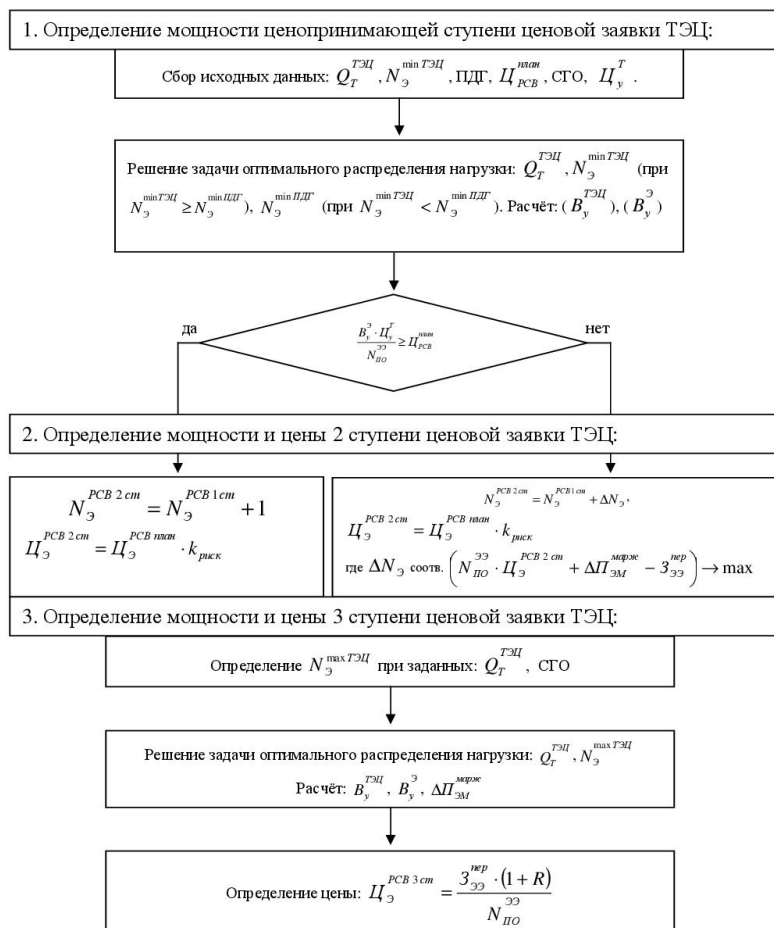


Рисунок 12 – Алгоритм формирования ценовой заявки ТЭЦ на РСВ:

$Z_{ЭЭ}^{пер}$ – переменные затраты, отнесенные на электрическую энергию; $N_{ПО}^{ЭЭ}$ – полезный отпуск электрической энергии; $C_{ЭЭ}$ – цена электрической энергии; $\Pi_{ЭМ}^{марж}$ – маржинальная прибыль от реализации электрической мощности; $(N_{ПО}^{ЭЭ} \cdot C_{ЭЭ} + \Pi_{ЭМ}^{марж} - Z_{ЭЭ}^{пер})$ – критерий оптимизации

Особенностью БР является то, что цена электроэнергии (индикатор БР) задана детерминированно. Оптимизация режима ТЭЦ на балансирующем рынке сводится к решению задачи по определению такой величины $\Delta N_{Э}$, при которой прибыль компании максимальна для подачи соответствующей оперативной ценовой заявки. Расчёт $\Delta N_{Э}$ предлагается производить по аналогии соответствующему этапу расчёта ценовой заявки на РСВ со следующими особенностями:

- переход к новому режиму работы (реализации $\Delta N_{Э}$) должен быть осуществлён максимально быстро, т. е. количество перераспределений нагрузок должно быть минимальным;

- должна оставаться возможность оперативного возврата в первоначальный режим при поступлении соответствующего требования со стороны системного администратора.

Внедрение предложенных малозатратных методов на ряде СЦТ населенных пунктов Забайкальского края показало их высокую эффективность. Фактический

эффект от внедрения только условно беззатратных (режимных) мероприятий составил более 70 млн руб/год.

Пятая глава посвящена малозатратным методам энергосбережения при отпуске тепловой энергии в СЦТ. Для оптимизации суточных графиков разработана математическая модель температурного запаздывания в СЦТ с учётом теплоаккумулирующих свойств тепловых сетей и потребителей тепловой энергии. При этом рассмотрено три случая:

1. Для участка тепловой сети (может быть использована для предварительных расчетов):

$$t_1 = t_0 \cdot \frac{2 - \varepsilon_{TC1}}{2 + \varepsilon_{TC1}} \cdot (1 - e^{-\varphi_1 \cdot \tau}) + t_1^H \cdot e^{-\varphi_1 \cdot \tau} + 2 \cdot t_n \cdot \frac{\varepsilon_{TC1}}{2 + \varepsilon_{TC1}} \cdot (1 - e^{-\varphi_1 \cdot \tau}), \quad (1)$$

где $\varepsilon_{TC1} = \frac{K_1 \cdot \pi \cdot l_1 \cdot (1 + \mu_1)}{v_1 \cdot c_p \cdot \rho_B}$ – безразмерный комплекс, характеризующий отношение потерь теплоты через тепловую изоляцию участка теплосети к потоку, проходящему через неё; t_n – температура наружного воздуха; t_1 , t_1^H – температура воды на конце участка тепловых сетей искомая и в начальный момент времени; $\varphi_1 = \frac{v_1}{V_1}$ – относительный расход; v_1 – объёмный расход воды на участке; V_1 – объём участка теплосети; t_0 – температурное возмущение в начале участка тепловых сетей; μ_1 – коэффициент местных потерь теплоты участка тепловых сетей; $K_1 \cdot \pi$ – линейные потери теплоты; l_1 – длина трубопровода участка тепловых сетей.

2. Для многовариантной конфигурации (n_{TC} участков) через усредненные параметры теплосети (может быть использована в упрощенных математических моделях):

$$t_{n_{TC}} = t_{n_{TC}}^H \cdot e^{-\frac{1}{\sum_{i=1}^{n_{TC}} \frac{1}{\varphi_i}} \cdot \tau} + \left(1 - e^{-\frac{1}{\sum_{i=1}^{n_{TC}} \frac{1}{\varphi_i}} \cdot \tau} \right) \cdot \left(2 \cdot t_n \cdot \left(\sum_{i=1}^{n_{TC}-1} \prod_{j=i+1}^{n_{TC}} \left[\frac{2 - \varepsilon_{TC(j)}}{2 + \varepsilon_{TC(j)}} \cdot \frac{\varepsilon_{TC(i)}}{2 + \varepsilon_{TC(i)}} \right] + \frac{\varepsilon_{TC(n_{TC})}}{2 + \varepsilon_{TC(n_{TC})}} \right) + \right. \\ \left. + t_0 \cdot \prod_{i=1}^{n_{TC}} \left[\frac{2 - \varepsilon_{TC(i)}}{2 + \varepsilon_{TC(i)}} \right] \right). \quad (2)$$

3. Точное решение задачи моделирования нестационарного теплового режима тепловых сетей с учётом их теплоаккумулирующих свойств и многовариантной конфигурации (n_{TC} участков):

$$t_{n_{TC}} = e^{\varphi_{n_{TC}} \cdot \tau} \cdot t_{n_{TC}}^H + \sum_{S=0}^{n_{TC}-1} \left[e^{\varphi_S \cdot \tau} - e^{\varphi_{n_{TC}} \cdot \tau} \right] \cdot \gamma_S^{n_{TC}}, \quad (3)$$

где $\gamma_S^{n_{TC}} = \gamma_S^{n_{TC}}(t_0) + \gamma_S^{n_{TC}}(t^H) + \gamma_S^{n_{TC}}(\beta)$;

при $S = 1, \dots, n_{TC} - 1$: $\gamma_S^{n_{TC}}(t_0) = t_0 \cdot \left(\psi_{P=0}^S(-) \cdot \prod_{R=S+1}^{n_{TC}} \left[\frac{1}{\varphi_S - \varphi_R} \cdot \alpha_R \right] \right)$;

$\gamma_S^{n_{TC}}(\beta) = \sum_{I=1}^S \left[\frac{\beta_I}{\alpha_I} \cdot \psi_{P=I-1}^S(-) \cdot \prod_{R=S+1}^{n_{TC}} \left(\frac{1}{\varphi_S - \varphi_R} \cdot \alpha_R \right) \right]$; $\gamma_S^{n_{TC}}(t^H) = \sum_{I=1}^S \left[t_I^H \cdot \psi_{P=I}^S(-) \cdot \prod_{R=S+1}^{n_{TC}} \left(\frac{1}{\varphi_S - \varphi_R} \cdot \alpha_R \right) \right]$;

$$\text{при } S = 0: \gamma_0^{n_{TC}}(t_0) = t_0 \cdot \prod_{I=1}^{n_{TC}} \left(\frac{1}{\varphi_0 - \varphi_I} \cdot \alpha_I \right); \gamma_0^{n_{TC}}(\beta) = \sum_{I=1}^S \left[\frac{\beta_I}{\alpha_I} \cdot \prod_{R=I}^{n_{TC}} \left(\frac{1}{\varphi_0 - \varphi_R} \cdot \alpha_R \right) \right]; \gamma_0^{n_{TC}}(t^H) = 0;$$

$$\psi_{P=R_1}^{(-)} = \left\{ \begin{array}{l} \prod_{i=R_1-1}^N \left[(-1) \cdot \frac{1}{\varphi_{i-1} - \varphi_i} \cdot \alpha_i \right] + \\ + \sum_{j_1=R_1-1}^{N-2} \sum_{j_2=j_1+1}^{N-1} \left(\prod_{i=R_1-1}^{j_1} \left[(-1) \cdot \frac{1}{\varphi_{i-1} - \varphi_i} \cdot \alpha_i \right] \cdot \prod_{i_2=j_1+1}^{j_2} \left[\frac{1}{\varphi_{i_2} - \varphi_{i_2+1}} \cdot \alpha_{i_2} \right] \right) \cdot \dots + \\ + \prod_{i_1=j_1+1}^N \left[(-1) \cdot \frac{1}{\varphi_{i_1-1} - \varphi_{i_1}} \cdot \alpha_{i_1} \right] \end{array} \right\};$$

$$\psi_{P=R_1}^{(+)} = \left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=R_1-1}^{N-1} \left(\prod_{i=R_1-1}^j \left[\frac{1}{\varphi_{i-1} - \varphi_i} \cdot \alpha_i \right] \cdot \prod_{i_2=j+1}^N \left[(-1) \cdot \frac{1}{\varphi_{i_2-1} - \varphi_{i_2}} \cdot \alpha_{i_2} \right] \right) + \\ + \sum_{j_1=R_1-1}^{N-3} \sum_{j_2=j_1+1}^{N-2} \sum_{j_3=j_2+1}^{N-1} \left(\prod_{i=R_1-1}^{j_1} \left[\frac{1}{\varphi_{i-1} - \varphi_i} \cdot \alpha_i \right] \cdot \prod_{i_2=j_1+1}^{j_2} \left[\frac{1}{\varphi_{i_2} - \varphi_{i_2+1}} \cdot \alpha_{i_2} \right] \cdot \prod_{i_3=j_2+1}^{j_3} \left[(-1) \cdot \frac{1}{\varphi_{i_3-1} - \varphi_{i_3}} \cdot \alpha_{i_3} \right] \right) + \dots + \\ + \prod_{i_1=j_1+1}^N \left[(-1) \cdot \frac{1}{\varphi_{i_1-1} - \varphi_{i_1}} \cdot \alpha_{i_1} \right] \end{array} \right\};$$

$$\alpha_1 \dots \alpha_{n_{TC}} = \varphi_1 \cdot \frac{2 - \varepsilon_{TC(1)}}{2 + \varepsilon_{TC(1)}}, \dots, \varphi_{n_{TC}} \cdot \frac{2 - \varepsilon_{TC(n_{TC})}}{2 + \varepsilon_{TC(n_{TC})}}; \beta_1, \dots, \beta_{n_{TC}} = 2 \cdot \varphi_1 \cdot t_n \cdot \frac{\varepsilon_{TC(1)}}{2 + \varepsilon_{TC(1)}}, \dots, 2 \cdot \varphi_{n_{TC}} \cdot t_n \cdot \frac{\varepsilon_{TC(n_{TC})}}{2 + \varepsilon_{TC(n_{TC})}}.$$

Моделирование теплового режима здания произведено с учётом теплоаккумулирующих свойств многослойных ограждающих конструкций. Оно осуществлялось на основе теплового баланса отопляемого здания в условиях нестационарного теплового процесса и k -слойной ограждающей конструкции. Получено решение, при условии стационарной температуры сетевой воды поступающей к потребителю, в следующем виде:

$$\bar{t}_e = \bar{t}_e^H \cdot e^{-\frac{f}{q}} + \frac{\left(t_{PC} - \frac{Q_{ГВС}^H}{W_M} \right) \cdot \frac{1}{0,5 + u} \cdot W_M^o + \chi_0 \cdot V_{зд} \cdot t_n + Q_{ВН}}{1 + u + \omega} \cdot \left(e^{-\frac{f}{q}} - 1 \right), \quad (4)$$

$$\text{где } f = - \left(\frac{1}{0,5 + u} \cdot W_M^o + \chi_0 \cdot V_{зд} \right);$$

$$q = V_e \cdot \rho_e \cdot c_e + F_{CT} \cdot \sum_{i=1}^{k_{CT}} \delta_{CT(i)} \cdot \rho_{CT(i)} \cdot c_{CT(i)} \cdot \left[1 - \frac{\left(\frac{1}{\alpha_e} + \sum_{j=1}^{i-1} \frac{\delta_{CT(j)}}{\lambda_{CT(j)}} \right) + \left(\frac{1}{\alpha_n} + \sum_{j=1}^i \frac{\delta_{CT(j)}}{\lambda_{CT(j)}} \right)}{2 \cdot \left(\frac{1}{\alpha_e} + \sum_{j=1}^{k_{CT}} \frac{\delta_{CT(j)}}{\lambda_{CT(j)}} + \frac{1}{\alpha_n} \right)} \right];$$

$Q_{ВН}$ – теплопоступления от внутренних источников; $Q_{ГВС}^H$ – нагрузка верхней ступени установки ГВС; χ_0 – удельная отопительная характеристика здания; $V_{зд}$ – наружный объём зданий; t_{PC} – температура сетевой воды на входе в здание; W_M^o , $W_M^{ГВС}$ – водяные эквиваленты системы отопления и верхней ступени установки ГВС; u – коэффициент смешения; ω – режимный коэффициент отопительного прибора, F_{CT} – суммарная поверхность стен здания; $\delta_{CT(i)}$ – толщина i -го слоя стены; $\rho_{CT(i)}$ – плотность материала i -го слоя стен здания; $c_{CT(i)}$ – теплоёмкость материала i -го слоя стен здания; V_e – объём внутреннего воздуха; ρ_e – плотность внутреннего воздуха; c_e – теплоёмкость внутреннего

воздуха.

В отличие от известных формул зависимость (4) позволяет учесть фактор многослойности, который может вносить большие искажения при оценке аккумулирующей способности. Доказано, что аккумулирующая способность стены различается более чем на 400 % при изменении порядка слоев ограждающих конструкций, что говорит о большей точности полученных зависимостей по сравнению со стандартной методикой.

Для оценки влияния нестационарных температурных изменений на источнике теплоснабжения (далее – ИТ) было получено решение с учетом уравнения (4):

$$\bar{t}_e = \bar{t}_e^n \cdot e^{\frac{f \cdot \tau}{q}} - \frac{\chi_0 \cdot V_{зд} \cdot t_n + Q_{ВН} - \frac{Q_{ГВС}^n}{W_M^{ГВС}} \cdot \frac{1}{0,5+u} \cdot W_M^o}{f} \cdot \left(1 - e^{\frac{f \cdot \tau}{q}}\right) + \frac{1}{\frac{0,5+u}{1+u} + \omega} \cdot W_M^o \cdot \left(\frac{t_{n_{TC}}^n}{q \cdot \varphi_{n_{TC}} - f} \cdot \left(e^{\varphi_{n_{TC}} \cdot \tau} - e^{\frac{f \cdot \tau}{q}} \right) + \sum_{s=0}^{n_{TC}-1} \left[\frac{e^{\varphi_s \cdot \tau} - e^{\varphi_{n_{TC}} \cdot \tau}}{q \cdot \varphi_s - f} \cdot \gamma_s^{n_{TC}} \right] \right) \quad (5)$$

Оценка достоверности разработанных моделей СЦТ показала высокую степень сходимости результатов моделирования с экспериментальными данными.

Поскольку режимы отпуска тепловой энергии имеют значительную неравномерность, то предложено разделять годовую и суточную оптимизацию температурного графика теплосети.

Алгоритм построения годового графика включает:

- определение диапазона оптимизации по напору и температуре прямой сетевой воды;
- расчёт затрат ИТ, относимых на отпуск тепловой энергии для всего диапазона оптимизации;
- определение напора и температуры прямой сетевой воды, соответствующих минимальным затратам;
- определение искомого графика качественно-количественного регулирования с учетом наличия или отсутствия частотного регулирования на сетевых насосах.

С использованием данной методики, по критерию минимальных затрат на отпуск тепловой энергии генерирующей компанией (с учетом затрат на перекачку теплоносителя), был скорректирован существующий температурный график поселения городского типа (далее – пгт) Ясногорское (Забайкальский край). Снижение затрат генерирующей компании при сохранении качества теплоснабжения составило около 1 млн руб/год. Другим примером реализации предложенной методики может служить оптимизация функционирования тепловых сетей г. Читы. В результате изменение температурного графика с $120/70^{\circ}C$ на $137/70^{\circ}C$, что соответствует изменению расхода от 10618 до 7942 м³/ч и отключению двух насосов на ИТ и пяти насосов на повысительных насосных города, при расчетной температуре $t_{нв} = -38^{\circ}C$, приводит к перерасходу топлива на 3,96 т.у.т./ч, или 8368 руб/ч. При этом снижение потребления электроэнергии сетевыми насосами в денежном эквиваленте

составит 27262 руб/ч Суммарный эффект составит 18894 руб/ч или ≈ 45 млн руб/год.

Поскольку потребители тепловой энергии реальных ТЭС расположены на разном расстоянии от ИТ, то при оптимизации отпуска теплоты необходимо разделять потребителей по географическому признаку. В районах теплоснабжения необходимо выделить характерных потребителей (обеспечение суточного теплоснабжения которого обеспечивает остальных потребителей района), принадлежащих к группам административных и жилых. Для оптимизации отпуска теплоты в режиме реального времени предлагается разделить сутки на ряд промежутков (2...8). В каждом из временных промежутков находятся усредненные параметры, характеризующие теплоснабжение: нагрузки ГВС для каждого из типов потребителей, а также температура наружного воздуха.

Первым этапом оптимизации является нахождение характерных потребителей для всей системы. Для этого могут быть использованы соответствующие модели функционирования системы. При этом годовой график гидравлических характеристик сети ($\Delta P_{уст}, V_{уст}$) является заданным.

Во втором этапе оптимизации находятся температуры прямой сетевой воды на ИТ в предшествующий временной промежуток, необходимые для того, чтобы в рассматриваемый временной промежуток температура сетевой воды на у характерных потребителей была равна температуре, найденной в первом этапе (с учетом зависимости (5)).

Результатом второго этапа является определение диапазона температур прямой сетевой воды на ТЭЦ для каждого интервала времени. Дополнительными условиями при расчете необходимой температуры прямой сетевой воды на ТЭЦ в рассматриваемый интервал времени является то, что максимальная скорость изменения температуры прямой сетевой воды на ТЭЦ не должна превышать 30 °С/ч. Также необходимо обеспечить соблюдение договорных условий качества теплоснабжения всех потребителей: $\bar{Q}_o = 1$ и отсутствие значительных изменений температуры внутреннего воздуха. Для учета данных ограничений необходимо при определении температуры в каждый временной промежуток учитывать возможность ее изменения относительно предшествующего значения, а также проверять диапазоны на соблюдение суточного баланса теплоснабжения и изменение температуры внутреннего воздуха с учетом теплоаккумулирующих свойств.

Третьим этапом оптимизации является расчет всех вариантов изменения температуры прямой сетевой воды по временным промежуткам, в пределах диапазонов, полученных во втором этапе. Предварительно необходимо разбить полученные во втором этапе диапазоны температур сетевой воды для каждого из временных промежутков с определенным шагом. В результате расчета получаем матрицу возможных изменений температуры прямой сетевой воды на коллекторах ТЭЦ в течение рассматриваемых суток.

Критерием оптимальности отпуска теплоты является минимизация суммарных в течение суток затрат в системе.

Оптимизация отпуска теплоты от ТЭЦ потребителю с учетом изменения

в течение суток нагрузки ГВС и температуры наружного воздуха была рассмотрена на примере СЦТ мкр. КСК (г. Читы). Теплоснабжение осуществляется от изолированной сетевой подогревательной установки 2-х ТА ПТ-60. Произведенные расчеты экономического эффекта показали экономию условного топлива в размере 305208 т.у.т./год, или 6,5 млн руб/год.

С учетом методик оптимизации предложен комплексный подход к повышению эффективности функционирования современных СЦТ. Данный подход заключается в совмещении метода оптимизации отпуска теплоты от ИТ потребителю с учетом изменения нагрузки ГВС и температуры наружного воздуха в течение суток посредством построения взаимосвязанных моделей потребителей тепловой энергии, тепловых сетей и ИТ с учетом реальных характеристик системы, полученных посредством натуральных экспериментальных исследований, и внесением изменений в сами системы, осуществляемые на основе расчета оптимальных характеристик системы в целом и ее составных частей за счет корректировки потокораспределения и набора оборудования тепловых пунктов ряда потребителей, в том числе с использованием НИЭ. Также в пятой главе рассмотрено повышение экономичности работы ТЭС за счет внедрения методов модернизации СЦТ. Повышение эффективности СЦТ за счет использования ТНУ в системах транспорта теплоносителя предложено на основе схемы рис. 13.

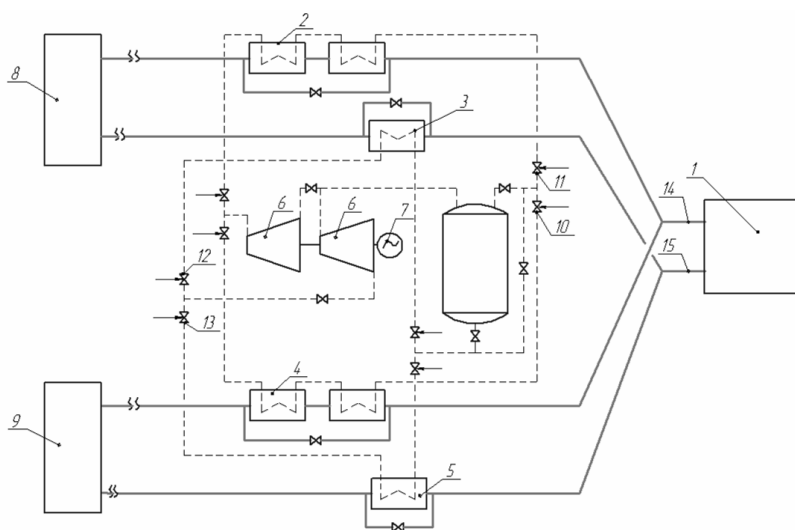


Рисунок 13 –
Принципиальная схема
метода:

- 1 – ИТ; 2, 3 – конденсатор ТНУ;
- 4, 5 – испаритель ТНУ;
- 6 – ТНУ; 7 – электродвигатель;
- 8 – группа потребителей I;
- 9 – группа потребителей II;
- 10–13 – регулятор расхода;
- 14 – магистраль от ИТ;
- 15 – магистраль к ИТ

Эффективность схемы определяется возможностью формирования оптимальных температурных графиков для разноудаленных районов теплоснабжения. Это определит возможность снизить затраты теплоснабжающей организации на топливо за счет отсутствия перетоков у потребителей, уменьшения температуры сетевой воды после установок ГВС у потребителей в ночное время (в период снижения соответствующей нагрузки). Формирование индивидуальных температурных графиков для разноудаленных районов теплоснабжения предлагается за счет выборочного догрева теплоносителя. Кроме того, применение ТНУ позволит значительно увеличить располагаемую мощность СЦТ при относительно небольших капитальных затратах. Расчет применения ТНУ для перераспределения потоков теплоты в СЦТ г. Читы показал экономию в размере около 19 млн руб/год.

Рассмотрено увеличение располагаемой мощности СЦТ за счет внедрения САР у конечных потребителей (на примере СЦТ ЧитТЭЦ-1). Показано, что повышение энергетической эффективности объектов исследования (за счет применения САР) позволит сократить фактически присоединенную нагрузку на 31,409 Гкал/ч. Данную нагрузку в плановом периоде можно реализовать путем подключения новых объектов, поскольку СЦТ г. Читы характеризуется дефицитом тепловой мощности. Расчет экономического эффекта от внедрения автоматизированных тепловых пунктов 229 жилых домов показал рентабельность мероприятия по автоматизации ИТП жилых домов с целью увеличения профицита располагаемой мощности ЧитТЭЦ-1 более 105%, что соответствует сроку окупаемости менее года.

Предложен способ совершенствования функционирования САР в СЦТ. Для решения проблемы затрат на оборудование предлагается внедрение системы для теплоснабжения групп потребителей, при которой полный комплект автоматики устанавливается только на потребителе с максимальной тепловой нагрузкой (автоматизированный потребитель), на остальных потребителях системы (неавтоматизированные потребители) устанавливаются только датчики температуры внутреннего воздуха и датчики расхода теплоносителя.

Приведены примеры практического использования данного способа в СЦТ г. Читы. Локального: на примере 2-х зданий ФГБОУ ВПО «ЗабГУ», расположенных на одном ответвлении от магистральной тепловой сети с нагрузками 1,2 и 0,3 Гкал/ч соответственно достигнуто снижение капитальных затрат на 97,7% (0,88 млн руб) при сохранении эффективности автоматизации. А также для крупных районов теплоснабжения: на примере СЦТ, работающей от ЧитТЭЦ-1. Использование взаимосвязей удаленных потребителей г. Чита (автоматизированного и неавтоматизированного) позволяет осуществлять качественное теплоснабжение «проблемного» района теплоснабжения (мкр. Сосновый Бор). Применение периодического натопа с учетом неравномерности в течение суток влияния автоматизированного потребителя (мкр. Октябрьский) на режим работы тепловой сети (6 часов вместо 24) позволило экономить порядка 3 369,6 тыс руб за отопительный период (в течение двухлетнего вынужденного режима).

В шестой главе разработаны технико-экономически обоснованные способы повышения энергетической и экологической эффективности КА, работающих в СЦТ.

На основе проведенного анализа химико-физических свойств природных цеолитов Забайкальского края были предложены способы снижения вредных выбросов от КА с факельным сжиганием топлива (см. рис. 14).

При реализации способа добавки реагента в опускную шахту КА происходит адсорбция SO_2 , SO_3 , NO_x и, как следствие, уменьшение содержания паров H_2SO_4 , что существенно повышает надежность низкотемпературных поверхностей нагрева. Экономическая эффективность метода определяется снижением расхода топлива за счет увеличения КПД КА (вызванного уменьшением температуры уходящих газов – Δq_x).

По результатам лабораторных исследований эффективности адсорбции SO_2 и NO_2 цеолитсодержащими породами (проведенных на оригинальных лабораторных установках) определена потенциальная возможность их применения на КА. Для использования в методиках эколого-экономической оценки полученные экспериментальные данные по содержанию $NO_x = f(b_c)$ и $SO_2 = f(b_c)$ были интерпретированы в форме аналитических выражений:

$$M_{NO_x} = (M_{NO_x}^0 - M_{NO_x}^k) \cdot \exp\left[-\left(\frac{b_c}{0,166 \cdot N^r}\right)^2\right] + M_{NO_x}^k, \quad (6)$$

$$M_{SO_2} = (M_{SO_2}^0 - M_{SO_2}^k) \cdot \exp\left[-\left(\frac{b_c}{0,32 \cdot S^r}\right)^2\right] + M_{SO_2}^k, \quad (7)$$

где $M_{NO_x}^k$ – массовые выбросы NO_x , не зависящие от b_c (максимально сниженные); $M_{NO_x}^0$ – исходные массовые выбросы NO_x (без применения метода); $M_{SO_2}^k$ – массовые выбросы SO_2 , не зависящие от b_c (максимально сниженные); $M_{SO_2}^0$ – исходные массовые выбросы SO_2 (без применения метода).

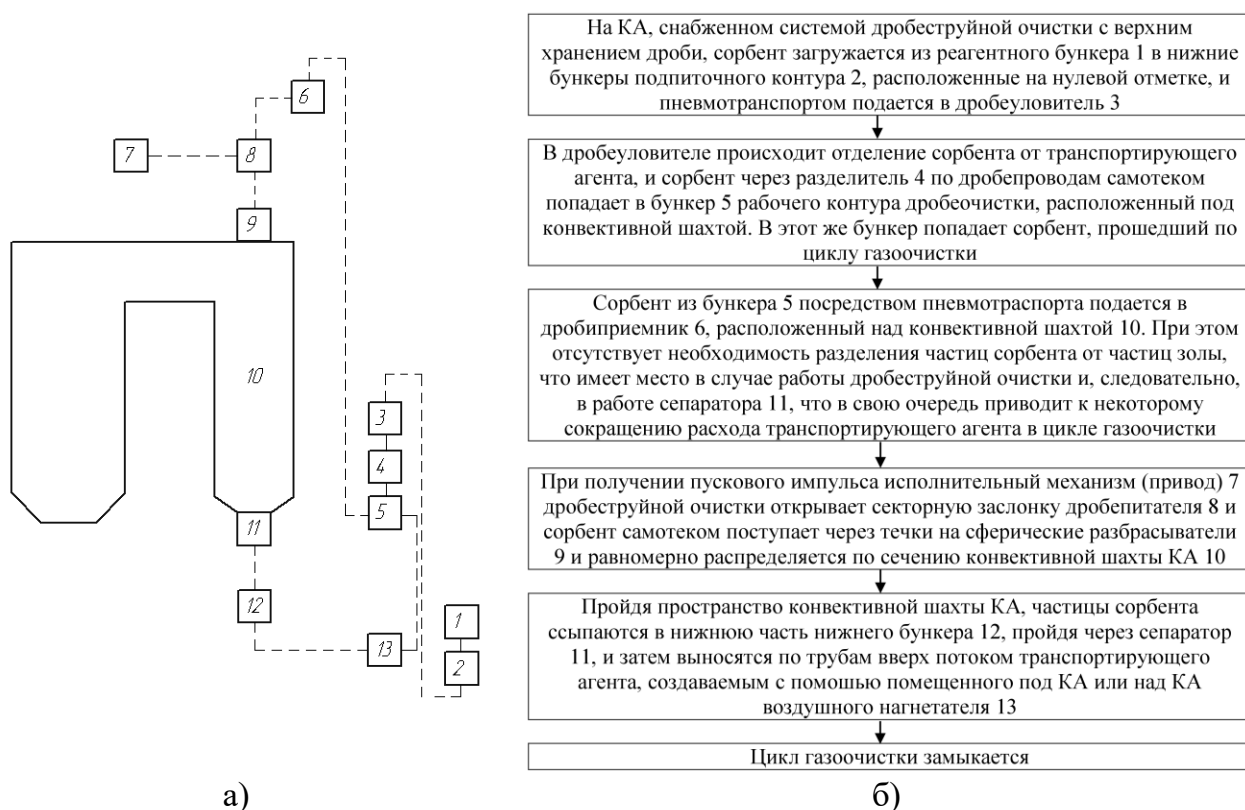


Рисунок 14– Схема (а) и алгоритм (б) реализации способа просыпки цеолитсодержащих пород

С целью подтверждения возможности промышленного применения цеолитсодержащих пород для уменьшения антропогенного воздействия КА ТЭС было проведено опытно-промышленное исследование на КА БКЗ–220–100 ст. № 6 ЧитТЭЦ-1. Эффективность метода согласно промиспытаниям составила 21,4 и 18,8 % (по NO_x и SO_2 соответственно), что доказывает эколого-экономическую обоснованность разработанного способа

применения цеолитсодержащих пород для снижения вредных выбросов от КА с объемным сжиганием топлива. Оценка режимов работы КА при промиспытаниях метода определила отсутствие риска шлакования его поверхностей нагрева и снижения надежности работы в целом.

Также в работе рассмотрены особенности оптимизации методов использования природных цеолитов для снижения антропогенного воздействия КА с объемным сжиганием топлива на основе критерия минимизации прироста годовых дисконтированных затрат – ΔZ , вызванных их реализацией. Представлены примеры оптимизации разработанных способов для БКЗ–220–100 ЧитТЭЦ-1 и ТПЕ–216 ХарГРЭС. Значения $b^{opt} = \lim_{\Delta Z \rightarrow \min} f(\Delta Z)$ определены: 2,7...2,9 % для БКЗ–220–100 и 2,1...2,3 % для ТПЕ–216, в условиях существующей платы за выбросы в РФ. Кроме того рассмотрена оптимизация методов в условиях платы за выбросы и экологических штрафов, действующих на территории Евросоюза. Определено, что оптимальный уровень дозирования цеолитсодержащих пород будет значительно выше, поскольку усредненный параметр компенсации антропогенного воздействия составляет 4,4 евро/кг для NO_x , а с учетом дополнительных параметров могут достигать 16 евро/кг для SO_x . Притом, что даже при существующем уровне платы за выбросы издержки на снижение выбросов SO_x и NO_x (по NO_x) равны $< 0,33$ руб/т NO_x , а лучшие зарубежные аналоги имеют издержки не менее 2,21 руб/т NO_x , можно сделать вывод о эколого-экономической привлекательности разработанных методов как в РФ, так и для условий Евросоюза.

Также в главе были предложены технологические рекомендации по совершенствованию существующих СЦТ за счет внедрения режимных методов и малозатратных способов модернизации, в том числе за счет использования НИЭ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационном исследовании разработан, обоснован и внедрен комплекс режимных методов и малозатратных способов модернизации, направленных на комплексное использование НИЭ для повышения энергетической и экологической эффективности существующих СЦТ, что определяет обеспечение выполнения государственных программ снижения энергоемкости ВВП и развития инфраструктуры для повышения качества жизни населения РФ.

Основные результаты выполненных исследований сводятся к следующему:

1. Разработаны высокоэффективные методы модернизации систем теплотребления потребителей тепловой энергии и КА ТЭС за счет использования ВИЭ в СЦТ (установка гелиовоздушного отопления, система нагрева сетевой воды, способ гелионагрева воздуха для КА ТЭС). Опытно-промышленная эксплуатация разработанных способов показала их высокую экономичность и минимальные сроки окупаемости, что обуславливает их широкое внедрение. Для вовлечения в хозяйственный оборот с участием ФГБОУ ВПО «ЗабГУ» было открыто малое инновационное предприятие с годовым оборотом более

7 млн руб/год.

2. Разработаны и теоретически обоснованы методики повышения эффективности функционирования СЦТ за счет использования ТНУ и современных САР. Внедрение предложенных способов модернизации СЦТ в г. Чите показало их высокую эффективность. Фактический эффект от внедрения составил более 3 млн руб за отопительный период.

3. Разработана система критериев оптимизации мероприятий, направленных на развитие СЦТ, дифференцированных по условиям различных экономических отношений.

4. На основе анализа существующего состояния оборудования и неравномерности режимов работы современных СЦТ сформулирован комплексный подход к оптимизации их функционирования, совмещающий режимные методы с рационализацией потокораспределения и состава оборудования. В рамках данного подхода предложена оптимизация графиков центрального регулирования, включающая способ построения энергоэффективного годового графика центрального регулирования отпуска теплоты в СЦТ и методику оптимизации графиков отпуска тепловой энергии в СЦТ с учетом теплоаккумулирующих свойств ограждающих конструкций и тепловых сетей.

5. Предложена оригинальная методика описания изменения нагрузки ГВС в течение суток для различных видов потребителей тепловой энергии, позволяющая определить ее в любой момент времени.

6. Разработана модель температурного запаздывания в СЦТ с учётом теплоаккумулирующих свойств тепловых сетей и потребителей тепловой энергии.

7. Разработаны алгоритм и методика комплексной оптимизации режимов работы ТЭС в современных условиях её функционирования на ОРЭМ, реализованные в комплексе программ для ЭВМ, основанном на декомпозиции модели, и позволяющие, используя возможности современных вычислительных систем, с высокой скоростью находить решение:

- по выбору состава включённого генерирующего оборудования;
- по определению оптимальной загрузки ТЭЦ на РСВ и формированию оптимальных ценовых заявок;
- по оптимизации финансового результата при оперативном перераспределении тепловой и электрической энергии между ТА и при поставке электроэнергии на балансирующий рынок.

8. Внедрение предложенных режимных методов на ряде СЦТ населенных пунктов Забайкальского края показало их высокую эффективность. Фактический эффект от внедрения только условно беззатратных (режимных) мероприятий составил более 70 млн руб/год.

9. Предложены методы повышения эффективности и увеличения располагаемой мощности СЦТ за счет совершенствования потокораспределения в тепловых схемах ТЭС. Внедрение предложенных способов на ХарГРЭС показало их высокую эффективность. Фактический экономический эффект превысил 8 млн руб./год.

10. Представлена методика оптимизации способов повышения экологической

безопасности ТЭС с учетом технико-экономической рационализации использования адсорбентов.

11. Разработаны комбинированные способы совместного снижения выбросов SO_x и NO_x в СЦТ, обеспечивающие повышение эффективности основного оборудования ТЭС. Выполненные лабораторные и опытно-промышленные испытания (в том числе на оригинальных лабораторных стендах) предлагаемых способов подтвердили их высокую эффективность. Определено, что использование природного цеолита Шивыртуйского месторождения значительно снижает выбросы SO_x и NO_x , при этом эффективность использования топлива в КА возрастает на 0,56 %.

12. Результаты выполненных исследований используются в образовательном процессе на кафедре энергетики ФГБОУ ВО «ЗабГУ».

Основные материалы диссертации опубликованы в следующих работах:

Статьи в ведущих рецензируемых научных журналах из перечня ВАК по специальности 05.14.01 – Энергетические системы и комплексы:

1. Батухтин, А. Г. Влияние протяженности тепловых сетей на режимы отпуска теплоты от ТЭЦ с учетом функционирования потребителей / А. Г. Батухтин, О. Е. Куприянов // Промышленная энергетика. – 2005. – № 5. – С. 39–41.

2. Иванов, С. А. Методика расчета параметров потребителя при качественно-количественном регулировании в открытых системах централизованного теплоснабжения / С. А. Иванов, А. Г. Батухтин, В. В. Маккавеев // Промышленная энергетика. – 2008. – № 4. – С. 13–15.

3. Иванов, С. А. Расчет суточного графика отпуска теплоты от источника теплоснабжения при качественно-количественном регулировании в открытых системах централизованного теплоснабжения / С. А. Иванов, А. Г. Батухтин, В. В. Маккавеев // Промышленная энергетика. – 2008. – № 5. – С. 32–34.

4. Маккавеев, В. В. Практическое применение некоторых методик оптимизации режимов отпуска теплоты / В. В. Маккавеев, О. Е. Куприянов, А. Г. Батухтин // Промышленная энергетика. – 2008. – № 10. – С. 23–27.

5. Басс, М. С. Упрощенная методика расчета нормативов удельных расходов топлива в отопительных котельных применительно к условиям Забайкальского края / М. С. Басс, А. Г. Батухтин, С. А. Требунских // Промышленная энергетика. – 2009. – № 9. – С. 37–41.

6. Иванов, С. А. Метод повышения электрической мощности турбин / С. А. Иванов, А. Г. Батухтин, Н. В. Горячих // Промышленная энергетика. – 2009. – № 12. – С. 13–15.

7. Батухтин, А. Г. Применение оптимизационных моделей функционирования систем теплоснабжения для снижения себестоимости тепловой энергии и увеличения располагаемой мощности станции / А. Г. Батухтин, В. В. Маккавеев // Промышленная энергетика. – 2010. – № 3. – С. 7–8.

8. Горячих, Н. В. Некоторые методы повышения маневренности ТЭЦ /

Н. В. Горячих, А. Г. Батухтин, С. А. Иванов // Теплоэнергетика. – 2010. – №10. – С. 69–73.

9. Маккавеев, В. В. О проблеме ненормативного отпуска теплоты потребителям / В. В. Маккавеев, С. А. Иванов, А. Г. Батухтин // Промышленная энергетика. – 2010. – № 7. – С. 12–14.

10. Иванов, С. А. Повышение экономичности ТЭЦ путем оптимизации распределения потоков теплоты / С. А. Иванов, А. Г. Батухтин, П. Г. Сафронов // Промышленная энергетика. – 2011. – № 3. – С. 2–7.

11. Басс, М. С. Комплексный подход к оптимизации функционирования современных систем теплоснабжения / М. С. Басс, А. Г. Батухтин // Теплоэнергетика. – 2011. – №8. – С. 55–57.

12. Батухтин, А. Г. Моделирование современных систем централизованного теплоснабжения / А. Г. Батухтин, А. В. Калугин // Вестник ИрГТУ. – 2011. – Т. 55. – № 8. – С. 84–91.

13. Басс, М. С. Методика оптимизации состава оборудования в комбинированных системах теплоснабжения / М. С. Басс, А. Г. Батухтин, С. Г. Батухтин // Промышленная энергетика. – 2012. – № 10. – С. 49–52.

14. Пинигин, В. В. Оптимизация реагентных способов уменьшения вредных выбросов от котлов ТЭЦ / В. В. Пинигин, А. Г. Батухтин // Промышленная энергетика. – 2012. – № 12. – С. 46–49.

15. Кирилов, М. В. Метод расчета эффективности применения преобразователей частоты вращения двигателей центробежных насосов ТЭС / М. В. Кирилов, П. Г. Сафронов, А. Г. Батухтин // Промышленная энергетика. – 2013. – № 1. – С. 17–20.

16. Горячих, Н. В. Использование факторного анализа для оптимизации режимов работы систем теплоснабжения / Н. В. Горячих, А. Г. Батухтин // Промышленная энергетика. – 2013. – № 9. – С. 26–30.

17. Пинигин, В. В. Эксергетическая оценка способов снижения вредных выбросов от котельных установок ТЭС / В. В. Пинигин, А. Г. Батухтин // Промышленная энергетика. – 2015. – № 2. – С. 50–54.

18. Батухтин, А. Г. Применение водяных теплонасосных установок с неклассическим источником низкопотенциальной энергии для компенсации нагрузки горячего водоснабжения / А. Г. Батухтин, С. А. Иванов, М. В. Кобылкин // Промышленная энергетика. – 2015. – № 3. – С. 18–21.

19. Сафронов, П. Г. Способы повышения эффективности работы на ОРЭМ электростанции с высокой степенью автоматизации на примере Харанорской ГРЭС / П. Г. Сафронов, А. Г. Батухтин // Энергосбережение и водоподготовка. – 2019. – № 1(117). – С. 10–15.

Статьи других рецензируемых научных журналах из перечня ВАК:

20. Батухтин, А. Г. Разработка пакета прикладных программ по режимам работы ТЭЦ / А. Г. Батухтин // Вестник ЧитГТУ. – 2002. – № 26. – С. 143–144.

21. Иванов, С. А. Оптимизация систем централизованного теплоснабжения / С. А. Иванов, А. Г. Батухтин, Н. В. Горячих // Вестник МАНЭБ. – 2009. – Т. 14. – № 3. – С. 102–104.

22. Батухтин, А. Г. Современные методы повышения эффективности совместной работы установок гелиоотопления и систем централизованного

теплоснабжения / А. Г. Батухтин, С. Г. Батухтин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2009. – № 3. – С. 48–53.

23. Маккавеев, В. В. Математическая модель ряда абонентских вводов закрытых систем теплоснабжения / В. В. Маккавеев, А. Г. Батухтин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2009. – № 3. – С. 200–207.

24. Басс, М. С. Проблемы нормирования тепловых потерь в тепловых сетях на примере г. Чита / М. С. Басс, А. Г. Батухтин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2009. – № 4. – С. 177–183.

25. Батухтин, А. Г. Методы повышения эффективности функционирования современных систем транспортировки, распределения и потребления тепловой энергии / А. Г. Батухтин, М. С. Басс, С. Г. Батухтин // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2009. – № 2. – С. 199–202.

26. Сафронов, П. Г. Использование теплового насоса в тепловых схемах тепловых электростанций / П. Г. Сафронов, А. Г. Батухтин, С. А. Иванов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2009. – № 2. – С. 202–204.

27. Батухтин, А. Г. Методы повышения эффективности и увеличения располагаемой мощности систем централизованного теплоснабжения / А. Г. Батухтин // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2010. – № 1. – С. 189–192.

28. Сафронов, П. Г. Способ увеличения экономичности основного оборудования ТЭЦ / П. Г. Сафронов, С. А. Иванов, А. Г. Батухтин, И. Ю. Батухтина // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2010. – № 1. – С. 175–178.

29. Батухтин, А. Г. Обеззараживание воды в системах централизованного теплоснабжения / А. Г. Батухтин, В. В. Петин, И. Ф. Суворов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2010. – № 1. – С. 209–212.

30. Батухтин, А. Г. Использование тепловых насосов для повышения тепловой мощности и эффективности существующих систем централизованного теплоснабжения / А. Г. Батухтин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2010. – № 2. – С. 28–33.

31. Иванов, С. А. Сравнительная оценка эффективности способов получения дополнительной мощности от турбоагрегатов ТЭЦ / С. А. Иванов, А. Г. Батухтин, Н. В. Горячих // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2010. – № 2. – С. 33–44.

32. Петин, В. В. Современные технологии использования электрической энергии в системах централизованного теплоснабжения / В. В. Петин, А. Г. Батухтин, А. В. Калугин, П. Г. Сафронов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2010. – № 4. – С. 32–38.

33. Батухтин, А. Г. Особенности моделирования работы в течение суток установок гелионагрева абонентских вводов потребителей тепловой энергии / А. Г. Батухтин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2010. – № 4. – С. 50–58.

34. Дорфман, Ю. В. Моделирование поведения углей при разных способах его сжигания и их применение / Ю. В. Дорфман, Н. В. Горячих,

А. Г. Батухтин // Вестник ЧитГУ. – 2010. – № 9. – С.119–125.

35. Батухтин, А. Г. Особенности математических моделей современных теплопотребляющих установок в системах централизованного теплоснабжения / А. Г. Батухтин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2011. – № 1. – С. 250–255.

36. Петин, В. В. Комплексное использование инновационных методов обработки воды в системе "ТЭЦ-потребитель" / В. В. Петин, А. Г. Батухтин, Ю. В. Дорфман // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2011. – № 1. – С. 63–69.

37. Батухтин, А. Г. Особенности диспетчеризации современных систем теплоснабжения / А. Г. Батухтин // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2011. – № 1. – С. 198–201.

38. Калугин, А. В. Применение технологии тепловых насосов для повышения эффективности методов оптимизации отпуска теплоты / А. В. Калугин, А. Г. Батухтин, И. Ю. Батухтина // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2011. – № 1. – С. 201–203.

39. Требунских, С. А. Энтропийная эффективность теплопотребляющих объектов / С. А. Требунских, А. Г. Батухтин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2011. – № 2. – С. 91–99.

40. Батухтин, А. Г. Оптимизация предварительного подогрева холодного воздуха перед воздухоподогревателями котлов (на примере Харанорской ГРЭС) / А. Г. Батухтин, П. Г. Сафронов, М. В. Кирилов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2012. – № 1. – С. 97–102.

41. Батухтин, А. Г. Способ использования цеолитов для снижения вредных выбросов от котлов с факельным сжиганием топлива / А. Г. Батухтин, В. В. Пинигин // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2012. – № 1. – С. 266–269.

42. Петин, В. В. Оптимизация характеристик диафрагменного электрического разряда для систем водопользования ТЭС / В. В. Петин, А. Г. Батухтин // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2012. – № 1. – С. 367–370.

43. Батухтин, А. Г. Оптимизация режимов работы теплогенерирующего оборудования при использовании природных цеолитов для снижения вредных выбросов / А. Г. Батухтин, В. В. Пинигин // Вестник ЗабГУ. – 2012. – № 7(86). – С.19–24.

44. Батухтин, А. Г. Анализ методов повышения эффективности систем централизованного теплоснабжения / А. Г. Батухтин, В. В. Пинигин, М. В. Кобылкин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2012. № 3-2. – С. 45–51.

45. Батухтин, А. Г. Автоматизированная система регулирования расхода теплоносителя для теплоснабжения групп потребителей / А. Г. Батухтин, М. В. Кобылкин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2013. – № 2. – С. 68–72.

46. Басс, М. С. Методические вопросы оценки эффективности систем централизованного теплоснабжения / М. С. Басс, А. Г. Батухтин, С. А. Требунских // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2013. – № 2. –

С. 80–84.

47. Батухтин, А. Г. Повышение эффективности современных систем теплоснабжения / А. Г. Батухтин, С. А. Иванов, М. В. Кобылкин, А. В. Миткус // Вестник ЗабГУ. – 2013. – № 9(100). – С.112–120.

48. Батухтин, А. Г. О решении одной теплофизической системы линейных дифференциальных уравнений первого порядка с постоянными коэффициентами / А. Г. Батухтин, И. Ю. Батухтина // Ученые записки ЗабГУ. – 2015. – № 3(62). – С. 6–8.

49. Батухтин, А. Г. Энергоэффективная система теплоснабжения. Задачи и проблемы математического моделирования / А. Г. Батухтин, С. Г. Батухтин, М. В. Кобылкин, П. Г. Сафронов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2015. – № 2 – С. 157–160.

50. Батухтин, А. Г. Применение тепловых насосов для развития теплофикации / А. Г. Батухтин, М. В. Кобылкин, М. Г. Барановская // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2013. – № 2. – С. 80–84.

Статьи индексируемые в базах Web of Science и Scopus:

51. Batukhtin, A. G. A Technical and Economic Feasibility Study on the Choice of Solar Collector Power Output in Compound Heat Supply Systems / A. G. Batukhtin // World Applied Sciences Journal. – 2014. – Vol.31, № 4. – Pp. 542–547.

52. Batukhtin, A. Improving the Efficiency of Fuel Combustion in Boilers with Windmills-fans on the Example of Kharanorskaya SDPT / A. Batukhtin, P. Safronov, M. Kirillov // Middle-East Journal of Scientific Research. – 2014. – Vol.21, № 3. – Pp.487–490.

53. Batukhtin, A. G. Optimization for the Equipment in Combined Heating Systems / A. G. Batukhtin, M. S. Bass, S. G. Batukhtin // Modern Applied Science. – 2015. – Vol.9, № 5. – Pp.93–104.

54. Batukhtin, A. Improving the efficiency of fuel combustion in boilers with windmill fans / A. Batukhtin, S. Ivanov S. Batukhtin, M. Bass // Clean Coal Technology and Sustainable Development - Proceedings of the 8th International Symposium on Coal Combustion. ISCC 2015. Beijing. – 2016. – Pp. 183–187.

55. Batukhtin, A. Universal entropy efficiency of thermal processes / A. Batukhtin, M. Bass, S. Trebunskikh, S. Ivanov // Indian Journal of Science and Technology. – Vol.9, №44. – Pp. 1–11.

56. Batukhtin, A. Method of efficiency improvement in district heating systems / A.G. Batukhtin, M.S. Bass, S.A. Ivanov, S.G. Batukhtin, P.G. Safronov // American Journal of Applied Sciences. – Vol.3, №2. – Pp. 145–151.

57. Batukhtin, A. Solving a sequence of recurrence relations for first-order differential equations / Batukhtin, A., Batukhtina, I., Bass, M., Safronov, P., M. Baranovskaya // Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education. – Vol.13, №11. – Pp. 7179–7191.

58. Batukhtin, A. Obtaining a solution of a differential equations system for determining the heat networks retention/ Batukhtin, A., Batukhtina, I., Baranovskaya, M., Batukhtin, S., Kobylikin, M.// International Journal of Mechanical Engineering and Technology. – 2018. – Vol.9, №7. – Pp. 1300–1320.

59. Batukhtin, A. G. Application of heat pumps in a centralized heat supply as

the direction of the development of district heating / A. G. Batukhtin, M. G. Baranovskaia, S. G. Batukhtin, M. V. Kobylkin // Proceedings – 2018 International Ural Conference on Green Energy, UralCon 2018. Chelyabinsk. – 2018. – Pp. 45–50.

60. Batukhtin, A. Development and experimental verification of thermal inertia for a branched heat supply system / A. Batukhtin, I. Batukhtina, M. Bass, S. Batukhtin, M. Kobylkin, M. Baranovskaya, A. Baranovskaya // Journal of Applied Engineering Science. – 2019. Vol.17, №3. – Pp. 413 – 424.

Объекты интеллектуальной собственности:

61. Патент № 2403511 РФ, МПК F24J 2/42. Солнечная установка и способ ее работы/ Батухтин А. Г., Батухтин С. Г. (РФ). – № 2009119089/06; заявл. 20.05.2009; опубл. 10.11.2010, Бюл. № 31. – 6 с.

62. Патент № 2406830 РФ, МПК F01K 17/02. Способ работы тепловой электрической станции / Иванов С. А., Батухтин А. Г., Сафронов П. Г. – № 2009119115/06; заявл. 20.05.2009; опубл. 20.12.2010, Бюл. № 35. – 6 с.

63. Патент № 2429353 РФ, МПК F01K 17/02. Способ работы тепловой электрической станции / Батухтин А. Г., Горячих Н. В.. – № 2010100499/06; заявл. 11.01.2010; опубл. 20.09.2011, Бюл. № 26. – 8 с.

64. Патент № 2490318 РФ, МПК C10L 10/10. Способ снижения вредных выбросов от топок с факельным сжиганием топлива / Батухтин А. Г., Пинигин В. В. – № 2012125474/04; заявл. 19.06.2012; опубл. 20.08.2013, Бюл. № 23. – 4 с.

65. Патент № 2516114 РФ, МПК F24D 19/10. Автоматизированная система регулирования расхода теплоносителя для теплоснабжения группы потребителей / Батухтин А. Г., Кобылкин М. В., Кубряков К. А. – № 2012148860/12; заявл. 16.11.2012; опубл. 20.05.2014, Бюл. № 14. – 5 с.

66. Патент № 2527186 РФ, МПК F24D 10/00. Система автоматического регулирования отопления здания / Батухтин А. Г., Кобылкин М. В., Басс М. С. – № 2013107651/08; заявл. 20.02.2013; опубл. 27.08.2014, Бюл. № 24. – 6 с.

67. Патент № 2561846 РФ, МПК F24D 17/02. Способ горячего водоснабжения / Батухтин А. Г., Кобылкин М. В., Батухтин С. Г. – № 2013128513/12; заявл. 21.06.2013; опубл. 10.09.2015, Бюл. № 25. – 5 с.

68. Патент № 2601401 С1, МПК, F23L 15/04. Система подогрева воздуха для топливосжигающей установки / Батухтин А. Г., Кобылкин М. В., Батухтин С. Г., Иванов С. А. – № 2015119839/06/06; заявл. 26.05.2015; опубл. 10.11.2016, Бюл. № 31. – 5 с.

69. Патент № 86240 РФ, МПК F01K 17/00. Способ работы тепловой электрической станции / Иванов С. А., Батухтин А. Г., Горячих Н. В., Басс М. С. – № 2008151203/22; заявл. 23.12.2008; опубл. 27.08.2009, Бюл. № 24. – 2 с.

70. Патент № 91620 РФ, МПК F01K 13/00. Комплекс теплоснабжения / Батухтин А. Г., Басс М. С., Сафронов П. Г. – № 2009124235/22; заявл. 24.06.2009; опубл. 20.02.2010, Бюл. № 5. – 2 с.

71. Патент № 93941 РФ, МПК F24D 3/00. Комплекс теплоснабжения / Батухтин А. Г., Басс М. С., Батухтин С. Г. – № 2009142786/22; заявл. 19.11.2009; опубл. 10.05.2010, Бюл. № 13. – 1 с.

72. Патент № 100831 РФ, МПК G01N 33/22. Стенд для испытания присадок

к топливу / Дорфман Ю. В., Батухтин А. Г., Басс М. С., Сафронов П. Г. – № 2010121786/15; заявл. 28.05.2010; опубл. 27.12.2010, Бюл. № 36. – 2 с.

73. Патент № 123341 РФ, МПК В01D 53/02. Устройство для сухой очистки дымовых газов / Батухтин А. Г., Пинигин В. В. – № 2012115964/05; заявл. 19.04.2012; опубл. 27.12.12, Бюл. № 36. – 2 с.

74. Патент № 123533 РФ, МПК В01D 33/22. Стенд для исследования свойств твердых сорбентов / Батухтин А. Г., Пинигин В. В. - № 2012115961/15; заявл. 19.04.2012; опубл. 27.12.12, Бюл. № 36. – 2 с.

75. Свид. № 2008610504. РФ. Свидетельство об официальной государственной регистрации программ для ЭВМ. Оптимизация конфигурации (гидравлика, тепловое состояние, режимы работы) тепловых сетей / Маккавеев В. В., Батухтин А. Г. – № 2008610504. Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.

76. Свид. № 2009614236. РФ. Свидетельство об официальной государственной регистрации программ для ЭВМ. Программа для расчета реальных тепловых схем ТЭС и определения тепловых и электрических нагрузок между агрегатами «Scheme Calculation» / Батухтин А. Г., Сафронов П. Г., Мершеева В. А. – № 2009612936; заявл. 15.06.2009; опубл. 12.08.2009, Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.

77. Свид. № 2009614238 РФ. Свидетельство об официальной государственной регистрации программ для ЭВМ. Программа определения оптимальных технико-экономических показателей работы ТЭС / Басс М. С., Батухтин А. Г., Батухтин С. Г. – № 2009612938; заявл. 15.06.2009; опубл. 12.08.2009, Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.

78. Свид. № 2011610749 РФ. Свидетельство об официальной государственной регистрации программ для ЭВМ. Программа расчета котельного агрегата при условии его работы на угольно-цеолитовой топливной смеси «Reliab – esol – esonot» / Дорфман Ю. В., Батухтин А. Г., Пинигин В. В. – № 2010617099; заявл. 13.11.2010; опубл. 11.01.2011, Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.

79. Свид. № 2011612715 РФ. Свидетельство об официальной государственной регистрации программ для ЭВМ. Программа расчета и оптимизации теплогидравлических режимов систем централизованного теплоснабжения с совмещенными схемами присоединения установок ГВС «Hot-water» / Батухтин А. Г., Петин В. В. – № 2011611134; заявл. 22.02.2011; опубл. 06.04.2011, Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.

80. Свид. № 2016610577 РФ. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ. Программа расчета ТНУ в системах централизованного теплоснабжения. / Батухтин А. Г., Кобылкин М. В., Дорфман Ю. В., Барановская М. Г. – № 2016610577; заявл. 25.11.2015; опубл. 14.01.2016, Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.

Монографии и учебные пособия:

81. Иванов, С. А. Повышение эффективности работы ТЭЦ: оптимизация отпуска теплоты потребителю: монография / С. А. Иванов, А. Г. Батухтин, О. Е. Куприянов. – Новосибирск: Наука, 2008. – 80 с.

82. Маккавеев, В. В. Оптимизация отпуска теплоты при качественно-количественном регулировании открытых системах теплоснабжения: монография / В. В. Маккавеев, О. Е. Куприянов, А. Г. Батухтин. – Чита: ЧитГУ,

2009. – 132 с.

83. Батухтин, А. Г. Особенности совместной работы установок геонагрева и систем централизованного теплоснабжения: монография / А. Г. Батухтин. – Чита: ЗабГУ, 2011. – 155 с.

84. Батухтин, А. Г. Особенности моделирования современных систем централизованного теплоснабжения: монография / А. Г. Батухтин. – Чита: ЗабГУ, 2012. – 128 с.

85. Батухтин, А. Г. Разработка критериев и методов совершенствования систем централизованного теплоснабжения функционирующих в условиях резкоконтинентального климата: монография / А. Г. Батухтин. – Чита: ЗабГУ, 2013. – 216 с.

86. Батухтин, А. Г. Современные методы совершенствования систем централизованного теплоснабжения: монография / А. Г. Батухтин. – Чита: ЗабГУ, 2014. – 338 с.

87. Батухтин, А. Г. Применение методов математического моделирования в задачах теплоэнергетики: монография / А. Г. Батухтин, М. С. Басс, И. Ю. Батухтина. – Чита: ЗабГУ, 2015. – 276 с.

88. Батухтин, А. Г. Применение тепловых насосов в системах централизованного теплоснабжения: монография / А. Г. Батухтин, М. В. Кобылкин, С. А. Иванов, М. Г. Барановская. – Чита: ЗабГУ, 2018. – 251 с.

89. Батухтин, С. Г. Повышение эффективности систем централизованного теплоснабжения за счет использования нетрадиционных и возобновляемых источников энергии: монография / С. Г. Батухтин, А. Г. Батухтин. – Чита: ЗабГУ, 2018. – 282 с.

90. Середкин, А. А. Проблемы энергоэффективности теплоснабжения в Забайкальском крае: монография // С. Г. Батухтин, А. Г. Батухтин. – Чита: ЗабГУ, 2021. – 288 с.

91. Батухтин, А. Г. Применение цеолитсодержащих пород Восточного Забайкалья для снижения антропогенного воздействия ТЭС на окружающую среду: Учебное пособие / А. Г. Батухтин, М. С. Басс, Ю. В. Дорфман, С. А. Требунских. – Чита: ЧитГУ, 2011. – 160 с.

92. Батухтин, А. Г. Техничко-экономические основы проектирования ТЭС: учеб. пособие / А. Г. Батухтин, Ю. В. Дорфман, А. С. Стрельников, И. Ю. Батухтина. – Чита: ЗабГУ, 2012. – 140 с.

93. Середкин, А. А. Энергосбережение: учеб. пособие / А. А. Середкин, М. С. Басс, А. Г. Батухтин, А. С. Стрельников. – Чита: ЗабГУ, 2013. – 139 с.

94. Батухтин, А. Г. Особенности теплового и эксергетического расчета котлоагрегатов ТЭС: учеб. пособие / А. Г. Батухтин, В. В. Пинигин. – М.: ИД Академии естествознания, 2013. – 206 с.

95. Батухтин, А. Г. Расчет тепловой схемы и выбор оборудования теплоэлектроцентрали. Курсовое проектирование: учеб. пособие / А. Г. Батухтин, С. Г. Батухтин, П. Г. Сафронов, М. Г. Барановская. – Чита: ЗабГУ, 2018. – 116 с.

Отпечатано в типографии «ДубльПринт»
664046, г. Иркутск, ул. Волжская, 14, оф. 112
Заказ № 883, тираж 140 экз.