

На правах рукописи



ЗАМАЛЕЕВ МАНСУР МАСХУТОВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОФИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ
ЗА СЧЕТ РАСШИРЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛА ГОРОДСКИХ ТЭЦ**

Специальность: 2.4.5 - Энергетические системы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Ульяновск 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ульяновский государственный технический университет»

Научный консультант:

доктор технических наук, профессор Шарапов Владимир Иванович

Официальные оппоненты:

Тугов Андрей Николаевич, доктор технических наук, акционерное общество «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени Теплотехнический научно-исследовательский институт» (АО «ВТИ»), заведующий отделением парогенераторов и топочных устройств;

Кудинов Анатолий Александрович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет», профессор кафедры «Тепловые электрические станции»;

Зверева Эльвира Рафиковна, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет», профессор кафедры «Инженерная экология и безопасность труда».

Ведущая организация:

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва.

Защита состоится «20» июня 2025 г. в 11:15 часов на заседании диссертационного совета 24.2.303.01 при ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, корпус «Б», аудитория 237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина».

Текст диссертации размещен:

http://ispu.ru/files/Dissertaciya_Zamaleev_M.M..pdf

Автореферат диссертации размещен на сайте ИГЭУ www.ispu.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2025 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.2.303.01



Бушуев
Евгений Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Россия занимает первое место в мире по степени централизации теплоснабжения (около 73 % всех потребителей подключены к централизованным системам). Более 32 % потребителей тепловой энергии обеспечиваются теплофикационными (когенерационными) системами теплоснабжения, источниками теплоты в которых служат теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) различной мощности. При этом доля установленной электрической мощности ТЭЦ превышает 30 % мощности всех электростанций страны.

Анализ работы отечественных ТЭЦ и подключенных к ним систем теплоснабжения показывает, что в настоящее время энергетическая эффективность теплофикационных систем существенно снизилась, что обусловлено: существенным сокращением выработки электроэнергии на тепловом потреблении; значительными потерями при транспорте теплоносителя; условиями оптового рынка электроэнергии и мощности (ОРЭМ), не позволяющего обеспечивать стабильную загрузку турбоагрегатов ТЭЦ по тепловому графику.

По данным Минэнерго России, в связи с потерей промышленной тепловой нагрузки в виде пара и уходом части потребителей на теплоснабжение от собственных котельных отпуск теплоты от ТЭЦ за период с 1992 по 2013 гг. сократился почти в 1,5 раза. Благодаря принимаемым мерам за последнее десятилетие в отрасли централизованного теплоснабжения удалось стабилизировать негативную тенденцию отказа от подключения к ТЭЦ и перехода на теплоснабжение от собственных котельных. Однако, следует констатировать, что на многих ТЭЦ продолжает наблюдаться ежегодное снижение отпуска теплоты в размере 1,5 – 2 %.

Одной из основных проблем эксплуатации тепловых сетей являются сверхнормативные тепловые потери, а также значительные затраты электроэнергии на транспорт теплоносителя. Так, эксплуатационные затраты электроэнергии на перекачку теплоносителя составляют 6 - 10 % от стоимости отпускаемой тепловой энергии. Тепловые потери в трубопроводах магистральных тепловых сетей составляют около 10 - 12 % произведенной энергии.

В условиях современного энергетического рынка ТЭЦ становится все сложнее конкурировать с другими источниками тепловой и электрической энергии. Действующая модель ОРЭМ определяет принцип равенства генераторов независимо от расстояния передачи электроэнергии от электростанции до потребителя. Тарифы на электроэнергию от ТЭЦ, находящихся в центре нагрузок, включают в себя транспортную составляющую, сопоставимую со стоимостью производства электроэнергии. В таких условиях для собственников, владеющих теплофикационными системами, становится приоритетной работа только на тепловом рынке.

Несмотря на очевидные термодинамические преимущества теплофикационных систем с комбинированной выработкой электрической и тепловой энергии, в ряде случаев, при оптимизации тепловых узлов крупных городов России, рассматриваются проекты с отказом от восстановления паркового ресурса теплофикационных турбин и переводом тепловой нагрузки на водогрейные котлы.

В сложившихся условиях сохранение и развитие теплофикации является актуальной задачей, решение которой возможно за счет комплексного подхода к повышению эффективности когенерационных систем путем расширения функционала городских ТЭЦ.

Совместное производство тепловой и электрической энергии, а также продукции и услуг, необходимых в сфере жилищно-коммунального хозяйства, позволяет достичь системного энергетического эффекта, а также получить оптимальные режимы работы ТЭЦ в теплофикационном режиме.

В диссертационной работе обобщены разработанные автором технические и технологические решения, направленные на повышение эффективности городских ТЭЦ, сохранение и развитие когенерационных систем за счет:

- оптимизации тепловых схем и режимов работы ТЭЦ, функционирующих в современных экономических условиях;
- использования ТЭЦ для утилизации вывозимого с городских улиц снега в снегоплавильных установках (СУ) за счет применения низкопотенциальных источников теплоты;
- совместного использования инженерной инфраструктуры централизованного тепло- и водоснабжения потребителей, а именно применения ТЭЦ в схеме подготовки питьевой воды системы централизованного холодного водоснабжения;
- использования инфраструктуры ТЭЦ для утилизации коммунальных и производственных отходов термическими способами.

Тема диссертации соответствует приоритету п. б) «переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, повышение эффективности добычи и глубокой переработки углеводородного сырья, формирование новых источников, способов транспортировки и хранения энергии» Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации, приоритетному направлению развития науки, технологий и техники в Российской Федерации «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика», критическим технологиям «Технологии энергоэффективного производства и преобразования энергии на органическом топливе», «Технологии новых и возобновляемых источников энергии, включая водородную энергетику». Большинство прикладных задач диссертации решены в рамках хозяйственных работ по заказам энергетических компаний России, таких как ПАО «Т Плюс», АО «ТГК-11», ПАО «Интер РАО» и др., а также при выполнении НИР по двум грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержке молодых российских ученых – кандидатов наук, 2009 г., 2012 г.; гранту Фонда содействия инновациям по программе СТАРТ, грантам РФФИ.

Исследования и разработки в 2020-2023 годах выполнены при поддержке мегагрантом Правительства Российской Федерации для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных организациях высшего образования (проект 075-15-2021-584).

Степень разработанности темы диссертации. Существенный вклад в развитие и совершенствование централизованных систем теплоснабжения на базе ТЭЦ внесли отечественные ученые: Дмитриев В.В., Копьев С.Ф., Соколов Е.Я., Мелентьев Л.А., Андрищенко А.И., Громов Н.К., Зингер Н.М., Хлебалин Ю.М., Николаев Ю.Е., Щинников П.А., Кудинов А.А. и др.

Вопросы эффективного функционирования ТЭЦ в составе энерготехнологических комплексов также рассматривались отечественными учеными. Значительный вклад в обоснование эффективности энерготехнологических комплексов внесли: Соколов Е.Я., Бродянский В.М., Андрищенко А.И., Хлебалин Ю.М., Николаев Ю.Е. и др.

В исследовании возможностей расширения функционала ТЭЦ с целью их сохранения и развития в современных экономических условиях профессором МЭИ

В.Ф. Очковым рассмотрены несколько возможных дополнительных видов генерации, в том числе, за счет использования ТЭЦ для утилизации вывозимого с городских улиц снега. Однако при рассмотрении новых видов генерации не разрабатывались новые тепловые схемы, позволяющие реализовать расширение функционала ТЭЦ.

Существенный вклад в решение проблемы утилизации вывозимого с городских улиц снега внесли отечественные ученые АО «МосводоканалНИИпроект» и МГСУ (Пупырев Е.И., Корецкий В.Е. и др.). Ими разработаны практические рекомендации по реализации научно обоснованных технических и технологических решений при проектировании городских снегоплавильных пунктов, предусматривающих использование канализационных сточных вод для плавления снега. В настоящее время предложенные решения внедрены АО «Мосводоканал» на ряде объектов г. Москвы. К сожалению, реализованные в г. Москве стационарные снегоплавильные установки не используют для утилизации снега низкопотенциальные источники теплоты ТЭЦ.

Значительный вклад в развитие темы использования твердых коммунальных отходов (ТКО) в качестве топлива на ТЭС внесли отечественные ученые Всероссийского теплотехнического института (Тугов А.Н., Москвичев В.Ф., Родионов В.И. и др.). В работах д.т.н. Тугова А.Н. обобщен зарубежный и отечественный опыт энергетической утилизации ТКО. Во многих странах мира ТКО рассматривается как топливо. Несколько десятков государств официально считают применение ТКО для энергетической утилизации перспективным возобновляемым источником энергии (ВИЭ). Термическая переработка ТКО с выработкой электрической и тепловой энергии является основным и завершающим этапом решения вопроса санитарной очистки населенных пунктов от отходов, в том числе в так называемой экономике замкнутого типа.

В соответствии с Распоряжением Правительства РФ от 28.02.2017 № 355-р в России ведется строительство генерирующих объектов, функционирующих на основе использования отходов производства и потребления (Республика Татарстан - 55 МВт; Московская область и г. Москва - 280 МВт). Однако реализуемые в настоящее время проекты этих заводов не предусматривают совместное использование инфраструктуры существующих теплофикационных систем, в частности городских ТЭЦ, что не позволяет использовать ряд важнейших преимуществ:

- наличие на ТЭЦ низкопотенциальных источников тепловой энергии, которые могут быть использованы в технологической схеме сушки и термической переработки коммунальных и производственных отходов;

- возможность повышения экономичности ТЭЦ за счет частичного замещения отходами основного вида топлива, а также за счет реализации на рынке продуктов переработки пластика и резины;

- значительное снижение транспортных расходов на перевозку отходов в связи с нахождением большинства ТЭЦ в черте города;

- снижение капитальных затрат на строительство установок для термической переработки коммунальных и производственных отходов за счет использования существующей инфраструктуры ТЭЦ;

- возможность термического разложения ядовитых веществ в топках котлов ТЭЦ.

Таким образом, разработка новых технических и технологических решений, направленных на энергоэффективную термическую переработку коммунальных и производственных отходов с использованием инфраструктуры ТЭЦ, является актуальной научно-технической задачей.

Следует отметить, что автором в рамках кандидатской диссертации были предложены и научно обоснованы технические решения по оптимальному использованию отборов турбин ТЭЦ при подготовке подпиточной воды теплосети и добавочной питательной воды котлов применительно к условиям одной ТЭЦ без расчета и обоснования возможности тиражирования новых технологий. Под научным руководством автора в 2018 году была успешно защищена кандидатская диссертация Губина Игоря Викторовича по специальности 05.14.14 «Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты» на тему «Повышение эффективности ТЭЦ путем их использования в городской инженерной инфраструктуре», развитием которой стало обоснование возможности снижения капитальных затрат при реализации новых технических и технологических решений, направленных на расширение функционала ТЭЦ.

Целью диссертации является повышение эффективности теплофикационных систем путем разработки и научного обоснования технических и технологических решений, направленных на совершенствование тепловых схем и режимов работы ТЭЦ, а также использования инфраструктуры ТЭЦ для нужд коммунального хозяйства.

В работе сформулированы и решены следующие **задачи**:

1) проведен анализ существующего положения в сфере централизованного теплоснабжения на базе ТЭЦ, выявлены основные причины неэффективной работы ТЭЦ и подключенных к ним систем теплоснабжения;

2) исследованы возможные способы повышения эффективности ТЭЦ за счет расширения их функционала путем использования в городской инженерной инфраструктуре: для утилизации вывозимого с городских улиц снега, подготовки питьевой воды системы централизованного холодного водоснабжения, термической переработки коммунальных и производственных отходов;

3) разработан комплексный подход к повышению эффективности теплофикационных систем за счет совершенствования тепловых схем и режимов работы ТЭЦ в составе единого энергетического комплекса городского хозяйства;

4) разработаны технические и технологические решения совершенствования тепловых схем покрытия тепловых нагрузок водоподготовительных установок ТЭЦ (ВПУ ТЭЦ) с использованием низкопотенциальных отборов пара турбин;

5) расчетно-экспериментальным путем определены режимные характеристики турбин типа Т-100/120-130, обеспечивающие применимость разработанных технологий покрытия тепловых нагрузок ВПУ с использованием пятого нерегулируемого отбора пара, уточнены соответствующие расчетные зависимости;

6) предложен и обоснован усовершенствованный режим работы ВПУ ТЭЦ, позволяющий увеличить теплофикационную выработку электроэнергии за счет изменения режима работы баков-аккумуляторов подпиточной воды теплосети в открытых системах теплоснабжения;

7) предложено новое техническое решение, направленное на снижение затрат электроэнергии на транспорт теплоносителя теплофикационных систем за счет использования дополнительного источника энергии - мини-ГЭС на насосно-дресселирующих станциях тепловых сетей;

8) предложены новые и усовершенствованы существующие технические и технологические решения, направленные на расширения функционала ТЭЦ, а именно:

- использование низкопотенциальных источников теплоты ТЭЦ для утилизации вывозимого с городских улиц снега;

- применение городских ТЭЦ в схеме подготовки питьевой воды системы централизованного холодного водоснабжения;

- использование инфраструктуры ТЭЦ для термической переработки коммунальных и производственных отходов;

9) предложена усовершенствованная методика расчета технико-экономических показателей ТЭЦ при изменении тепловых схем и режимов работы оборудования, совмещающая в себе метод удельной выработки электроэнергии на тепловом потреблении, нормативную методику расчета показателей тепловой экономичности энергетического оборудования электростанций в соответствии с РД 34.08.552-93 и РД 34.08.552-95 «Методические указания по составлению отчета электростанции и акционерного общества энергетики и электрификации о тепловой экономичности оборудования», а также методику оценки выбросов CO₂;

10) выполнены технико-экономических расчеты разработанных технических и технологических решений.

Соответствие паспорту специальности. Работа соответствует паспорту специальности *в части направления исследований* - пункту 3: «Разработка, исследование, совершенствование действующих и освоение новых технологий и оборудования для производства электрической и тепловой энергии, использования органического ... топлив(а), и возобновляемых видов энергии, водоподготовки ..., способов снижения негативного воздействия на окружающую среду...»; пункту 5: «Разработки и исследования в области энергосбережения и ресурсосбережения при производстве тепловой и электрической энергии, при транспортировке тепловой ... энергии и энергоносителей в энергетических системах и комплексах»; пункту 6: «...проектирование энергоустановок..., функционирующих на основе преобразования возобновляемых видов энергии (энергии водных потоков...) с целью ... оптимизации их параметров, режимов работы, экономии ископаемых видов топлива и решения проблем экологического ... характера»; пункту 7: «Исследование влияния технических решений, принимаемых при создании и эксплуатации энергетических систем ... и установок на их финансово-экономические и инвестиционные показатели, региональную экономику ...».

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработан комплекс положений, определяющих общую направленность повышения эффективности теплофикационных систем за счет совместного развития предприятий энергетики и ЖКХ региона, в рамках которого предложены и научно обоснованы технические и технологические решения по совершенствованию тепловых схем и режимов работы ТЭЦ, расширению их функционала в составе единого энергетического комплекса городского хозяйства.

2. Разработана и научно обоснована серия высокоэкономичных технологических решений по совершенствованию тепловых схем водоподготовительных установок ТЭЦ с использованием низкопотенциальных отборов пара турбин.

3. Расчетно-экспериментальным путем установлены совокупности режимных параметров теплофикационных турбин типа Т-100/120-130, обеспечивающие необходимый для реализации разработанных технических решений регулировочный диапазон изменения давления пара в камере пятого нерегулируемого отбора.

4. Предложен и обоснован усовершенствованный режим работы ВПУ ТЭЦ, позволяющий увеличить теплофикационную выработку электроэнергии за счет изменения режима работы баков-аккумуляторов подпиточной воды теплосети в открытых системах теплоснабжения.

5. Предложено и защищено патентом РФ новое техническое решение, позволяющее снизить затраты электроэнергии на транспорт теплоносителя теплофикационных систем за счет использования дополнительного источника энергии - мини-ГЭС на насосно-дроселирующих станциях тепловых сетей.

6. Предложены и обоснованы новые и усовершенствованы существующие технические и технологические решения, обеспечивающие повышение эффективности теплофикационных систем за счет расширения функционала городских ТЭЦ:

- технологии применения низкопотенциальных источников теплоты ТЭЦ в качестве греющей среды в стационарных снегоплавильных установках;

- технология применения отработавшего пара турбин ТЭЦ в схемах подготовки воды для целей централизованного холодного водоснабжения;

- технологии использования инфраструктуры ТЭЦ для термической переработки коммунальных и производственных отходов.

7. Предложена усовершенствованная методика расчета технико-экономических показателей ТЭЦ (ТЭП ТЭЦ) при изменении тепловых схем и режимов работы оборудования, совмещающая в себе несколько методов: метод удельной выработки электроэнергии на тепловом потреблении (УВЭТП), нормативную методику расчета показателей тепловой экономичности энергетического оборудования электростанций (в соответствии с РД 34.08.552-93 и РД 34.08.552-95), а также методику оценки выбросов CO₂. Основным преимуществом предложенной методики является существенное уменьшение необходимых для выполнения расчетов исходных данных. Изменение режимов работы оборудования учитывается введением поправок по типовым энергетическим характеристикам.

Теоретическая значимость работы обоснована следующим. Разработан комплексный подход к повышению эффективности теплофикационных систем за счет совместного развития предприятий энергетики и ЖКХ региона, совершенствования тепловых схем и режимов работы ТЭЦ в составе единого энергетического комплекса городского хозяйства. Доказана возможность повышения эффективности теплофикационных систем за счет расширения функционала ТЭЦ. Предложена усовершенствованная методика расчета технико-экономических показателей ТЭЦ при изменении тепловых схем и режимов работы оборудования электростанции с учетом метода удельной выработки электроэнергии на тепловом потреблении, нормативной методики расчета тепловой экономичности ТЭЦ, а также методики оценки выбросов CO₂.

Практическая значимость результатов работы заключается в следующем:

1. Предложен и научно обоснован комплекс запатентованных технических и технологических решений, позволяющих повысить эффективность ТЭЦ за счет применения низкопотенциальных регенеративных отборов пара теплофикационных турбин для покрытия тепловых нагрузок водоподготовительных установок.

2. Получены новые результаты расчетно-экспериментальных исследований, позволяющие оценивать эффективность использования пятого низкопотенциального регенеративного отбора теплофикационных турбин типа Т Уральского турбинного завода для расширения внутренней теплофикации.

3. Предложены и научно обоснованы новые технологии применения низкопотенциальных источников теплоты ТЭЦ в качестве греющей среды снегоплавильных установках. Для внедрения рекомендована технология с применением обратной сетевой воды, отбираемой в теплообменник снегоплавильной установки из общего коллектора на вводе ТЭЦ. Применительно к городам средней полосы России, при использовании в качестве греющей среды обратной сетевой воды экономия условного топлива на ТЭЦ превышает 14 600 тонн за сезон для снегоплавильной установки производительностью 650 т/ч (расчет выполнен для условий г. Ульяновска).

4. Предложена и научно обоснована новая технология применения отработавшего пара турбин ТЭЦ в схемах подготовки воды для целей централизованного холодного водоснабжения. Показано, что, применительно к погодным условиям средней полосы России, экономический эффект от применения новой технологии составляет более 6000 тонн условного топлива в год. В расчете учитывалось, что предложенная схема реализуется на ТЭЦ ВАЗа при условии эксплуатации в течение 8 месяцев в году и среднечасовом расходе питьевой воды через конденсатор выделенной турбины 1300 м³/ч.

5. Доказана возможность увеличения теплофикационной выработки электроэнергии на ТЭЦ за счет изменения режима работы баков-аккумуляторов подпиточной воды теплосети в открытых системах теплоснабжения. Проведенные для реальных условий работы ТЭЦ ВАЗа расчеты показывают, что при имеющейся полезной емкости установленных аккумуляторных баков дополнительная теплофикационная мощность, вырабатываемая турбоустановкой с турбиной типа Т-100-130, превышает 19 МВт.

6. Предложено и научно обосновано новое техническое решение, позволяющее снизить до 20 % затраты электроэнергии на насосно-дресселирующих станциях тепловых сетей за счет использования дополнительного источника энергии - мини-ГЭС.

7. Разработаны и зарегистрированы две программы для ЭВМ, позволяющие рассчитывать удельные расходы условного топлива на отпуск тепловой и электрической энергии в соответствии с усовершенствованной методикой расчета технико-экономических показателей ТЭЦ.

8. Для термической переработки пластика на ТЭЦ предложена новая запатентованная технология, предусматривающая использование отборного пара турбин в экструзионных установках. В сравнении с электрическим нагревом экономия от применения отборного пара турбин в экструзионной установке составляет 542 руб. и 580 руб. с одной тонны переработанных отходов пластмасс, соответственно, при использовании производственного и отопительного отборов.

Методология и методы исследований. Решение поставленных задач выполняется в рамках комплексного развития и реализации производственного потенциала региона с учетом расширения функционала ТЭЦ. В работе использованы методы вычислительной математики, технической термодинамики, тепломассообмена, гидравлики, технико-экономических расчетов в энергетике, теории математической статистики, многофакторного эксперимента. Для выполнения гидравлических расчетов систем тепло- и водоснабжения использовался пакет прикладных специализированных программ ZuluThermo и ZuluHydro. Для автоматизации расчетов использовались пакеты прикладных программ ThermoFlow, STAR-CCM+, Statistica.

Достоверность и обоснованность результатов обусловлена применением методов и методик исследования, основанных на фундаментальных законах технической тер-

динамики, методах вычислительной математики и гидрогазодинамики, тепломассообмена; апробированных методик технико-экономического анализа в энергетике, обработки результатов инженерного эксперимента; сопоставимостью полученных данных с экспериментальными данными и опубликованными данными других авторов; патентной чистотой разработанных решений.

Положения, выносимые на защиту:

1. Научно обоснованные технические и технологические решения, направленные на повышение эффективности внутренней теплофикации за счет использования низкопотенциальных регенеративных отборов пара турбин для покрытия тепловых нагрузок ВПУ ТЭЦ.

2. Результаты расчетно-экспериментального исследования режимных параметров теплофикационных турбин Т-100/120-130, обеспечивающие необходимый для реализации разработанных технических решений регулировочный диапазон изменения давления пара в камере пятого нерегулируемого отбора.

3. Усовершенствованный режим работы ВПУ ТЭЦ, позволяющий увеличить теплофикационную выработку электроэнергии за счет изменения режима работы баков-аккумуляторов подпиточной воды теплосети в открытых системах теплоснабжения.

4. Научно обоснованное техническое решение, позволяющее уменьшить затраты электроэнергии на транспорт теплоносителя теплофикационных систем за счет использования дополнительного источника энергии - мини-ГЭС на насосно-дросселирующих станциях тепловых сетей.

5. Новые и усовершенствованные существующие технические и технологические решения, обеспечивающие повышение эффективности теплофикационных систем за счет расширения функционала городских ТЭЦ:

- технологии применения низкопотенциальных источников теплоты ТЭЦ в качестве греющей среды в стационарных снегоплавильных установках;

- технология применения отработавшего пара турбин ТЭЦ в схемах подготовки воды для целей централизованного холодного водоснабжения;

- технологии использования инфраструктуры ТЭЦ для термической переработки коммунальных и производственных отходов.

6. Усовершенствованную методику расчета технико-экономических показателей ТЭЦ при изменении тепловых схем и режимов работы оборудования, совмещающую в себе метод удельной выработки электроэнергии на тепловом потреблении, нормативную методику расчета показателей тепловой экономичности энергетического оборудования электростанций, а также методику оценки выбросов CO₂.

7. Результаты расчетов технико-экономических показателей ТЭЦ при внедрении разработанных технических и технологических решений, направленных на повышение эффективности теплофикационных систем.

Реализация результатов работы. Результаты, полученные в рамках исследования, используются на действующих объектах теплоэнергетики в городских теплофикационных системах:

- на Ульяновской ТЭЦ-1 реализованы предложенные автором технологии энергоэффективного покрытия тепловых нагрузок ВПУ с использованием низкопотенциальных регенеративных отборов пара турбин;

- разработанные в диссертации решения по оптимальному использованию регенеративных отборов турбин при подготовке подпиточной воды теплосети и добавочной

питательной воды котлов приняты к внедрению в Самарском филиале ПАО «Т Плюс» для оптимизации тепловых схем ТЭЦ в г. Самара и г. Тольятти;

- энергоэффективная технология утилизации снега на городских ТЭЦ принята к использованию в рамках региональной Дорожной карты по направлению «EnergyNet» Национальной технологической инициативы, а также приняты к внедрению на предприятиях Ульяновского филиала ПАО «Т Плюс»;

- усовершенствованный режим работы водоподготовительных установок ТЭЦ, позволяющий увеличить теплофикационную выработку электроэнергии за счет изменения режима работы баков-аккумуляторов подпиточной воды теплосети, используется на Ульяновской ТЭЦ-1;

- усовершенствованная методика расчета технико-экономических показателей ТЭЦ при изменении тепловых схем и режимов работы оборудования, реализованная в виде зарегистрированных программных продуктов внедрена в филиале «Ульяновский» ПАО «Т Плюс» и применяется для расчета удельных расходов условного топлива при планировании режимов работы ТЭЦ на оптовом рынке электроэнергии, а также для обоснования эффективности структурных и режимных изменений в схемах ТЭЦ.

Суммарный экономический эффект от реализации результатов работы, подтвержденный актами внедрения, только для теплофикационной системы города Ульяновска оценивается в 20 000 т у.т. в год (без учета платежей за утилизацию принимаемого на ТЭЦ снега (около 100 млн руб.), а также выручки от продажи вторично переработанного пластика (около 200 млн руб.). В городах с более крупными теплофикационными системами (например, в Самаре, Саратове, Казани, Перми, Омске и др.) ожидаемый экономический эффект в 2 - 2,5 раза больше, чем для Ульяновска.

Личное участие автора в получении результатов работы состоит в разработке комплексного подхода к повышению эффективности теплофикационных систем за счет расширения функционала городских ТЭЦ; разработке и обосновании оптимальных тепловых схем и режимов работы ТЭЦ, позволяющих наиболее полно использовать преимущества теплофикации в современных экономических условиях; руководстве и непосредственном участии в экспериментальных исследованиях, доказывающих промышленную применимость разработанных технологий покрытия тепловых нагрузок ВПУ с использованием низкопотенциальных регенеративных отборов пара турбин типа «Т», а также исследовании применимости нового режима использования баков-аккумуляторов подпиточной воды теплосети; разработке технического решения, направленного на снижение затрат электроэнергии на транспорт теплоносителя теплофикационных систем за счет использования дополнительного источника энергии - мини-ГЭС на насосно-дросселирующих станциях тепловых сетей; в исследованиях возможностей расширения функционала городских ТЭЦ; разработке технологий применения низкопотенциальных источников теплоты ТЭЦ в качестве греющей среды в стационарных снегоплавильных установках; разработке технологии применения отработавшего пара турбин ТЭЦ в схемах подготовки воды для целей централизованного холодного водоснабжения; разработке технических и технологических решений, направленных на эффективную термическую переработку коммунальных и производственных отходов с использованием инфраструктуры ТЭЦ; разработке усовершенствованной методики расчета технико-экономических показателей ТЭЦ при изменении тепловых схем и режимов работы оборудования, совмещающей в себе метод удельной выработки электроэнергии на тепловом по-

треблении, нормативную методику расчета показателей тепловой экономичности электростанций, а также методику оценки выбросов CO₂; в разработке идеологии, расчетных алгоритмов и руководстве программной реализацией при создании прикладных программных комплексов; в непосредственном участии и руководстве работами по всем направлениям практической реализации результатов диссертации; в подготовке публикаций по теме диссертации.

Апробация работы. Результаты диссертации опубликованы и обсуждались на двадцати шести конференциях: Международных научных конференциях «Современные научно-технические проблемы теплоэнергетики и пути их решения» (Саратов, 2008, 2010 гг.); XII, XIII, XIV, XV Международных научно-технических конференциях «Совершенствование энергетических систем и теплоэнергетических комплексов» (Саратов, СГТУ, 2014, 2016, 2018, 2020 гг.); VI, VII Международных научно-технических конференциях «Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности» (Ульяновск, УлГТУ, 2013, 2017 гг.); VI, VII Школе-семинаре молодых ученых академика РАН В.Е. Алемасова «Проблемы теплообмена и гидродинамики в энергомашиностроении» (Казань, 2008, 2010 гг.); VII Международном симпозиуме «Энергоресурсоэффективность и энергосбережение» (Казань, 2007 г.); III, IV, VIII Международных научно-технических конференциях «Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции» (Москва, МГСУ, 2009, 2011, 2020 гг.); I и II Всероссийских научно-практических конференциях «Повышение надежности и эффективности эксплуатации электрических станций и энергетических систем» (Москва, НИУ МЭИ, 2010, 2012 гг.); IV Международной научно-технической конференции «Муниципальная энергетика: проблемы, решения» (Украина, г. Николаев, 2011 г.); II и III Российско-немецкой научной конференции «Строительство и энергосбережение в 21 веке» (Ульяновск-Дармштадт, 2013, 2018 гг.); Международной конференции по энергоэффективности и возобновляемой энергетике (Украина, г. Киев, 2011 г.); Международных конференциях «Современные проблемы теплофизики и энергетики» (Москва, НИУ МЭИ, 2017, 2020 гг.); Всероссийской научной конференции с международным участием «XI Семинар ВУЗов по теплофизике и энергетике» (Санкт-Петербург, СПбПУ, 2019 г.); I и II Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Развитие методов прикладной математики для решения междисциплинарных проблем энергетики» (Ульяновск, УлГТУ, 2021, 2022 гг.); XVI Минском международном форуме по теплообмену (Минск, 2022 г.); заседаниях постоянно действующего семинара научно-исследовательской лаборатории «Теплоэнергетические системы и установки» УлГТУ (Ульяновск, 2003-2020 гг.), а также Лаборатории междисциплинарных проблем энергетики УлГТУ (Ульяновск, 2021-2023 гг.).

Научно обоснованные технические и технологические решения автора, направленные на повышение эффективности теплофикационных систем, представлялись на различных конкурсах научных проектов и грантов и были удостоены следующих наград: два гранта Президента Российской Федерации по государственной поддержке молодых российских ученых – кандидатов наук, 2009 г., 2012 г.; Два гранта Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере по программе УМНИК и СТАРТ; Премия Российского союза научных и инженерных общественных организаций в области науки для молодежи «Надежда России» 2010 г.; Премия Общенационального Совета просветительских организаций в области энергетики, 2010 г.; Золотая медаль Шестой Международной ярмарки изобретений SIIF-2010, г. Сеул, Республика Корея; Золотая медаль X Московского международного салона инноваций и инвестиций,

2010 г.; Золотая медаль 61-й Международной выставки «Идеи, изобретения, инновации» - «IENA-2009», г. Нюрнберг, Германия, 2009 г. В 2022 году получено благодарственное письмо «За вклад в развитие изобретательства и рационализаторства в Ульяновской области» от заместителя председателя Комитета ГД РФ по науке и высшему образованию Кононова В.М.

Публикации. Материалы диссертации отражены в 124 опубликованных работах, в том числе, в 2 монографиях, 24 статьях в рецензируемых журналах по списку ВАК, 11 статьях в изданиях, индексируемых в международных базах Scopus и Web of Science; 5 статьях в прочих журналах; 17 статьях в сборниках научных трудов; 46 тезисах и полных текстах докладов конференций; получено 17 патентов РФ, а также 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения по работе, списка использованных источников из 175 наименований. Текст диссертации изложен на 393 стр. машинописного текста, содержит 93 рисунка, 42 таблицы и приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования, показаны научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе проведен анализ существующего положения в сфере централизованного теплоснабжения на базе ТЭЦ.

Эффективность использования отборов пара теплофикационных турбин (отопительных, регенеративных) для нужд теплового потребления в значительной мере определяет экономичность работы теплоэлектроцентралей. В СССР в качестве основного способа экономии органического топлива в масштабах страны применялась теплофикация - централизованное теплоснабжение на базе комбинированной выработки электрической и тепловой энергии. Также в советское время уделялось значительное внимание развитию внутренней теплофикации - использованию отборов пара турбин для подогрева питательной воды и других технологических внутристанционных потоков теплоносителей.

Кризисные явления 1990-х годов в экономике страны оказали сильное влияние на загрузку и работу теплоэлектроцентралей и подключенных к ним систем теплоснабжения. За период с 1992 по 2013 год коэффициент использования теплоты топлива (КИТ) на тепловых электростанциях снизился с 56,9 % до 53,8 % или почти на 3 %. Значение КИТ на ТЭС с 2015 по 2022 гг. выросло на 2,2 п.п. и составило 56,2 %, однако, следует констатировать, что несмотря на вводы новых эффективных парогазовых и газотурбинных установок на ТЭЦ значение КИТ достигло только уровня 1992 г. Показательным является опыт развития теплофикационных систем в Дании и Финляндии. За период с начала 90-х годов на тепловых электростанциях Дании и Финляндии КИТ вырос с 52 % до 80 %.

Негативное влияние на теплофикационные системы оказывает существующая в России модель оптового рынка электроэнергии и мощности, не позволяющая обеспечить работу ТЭЦ по тепловому графику, что существенно снижает экономичность теплоэлектроцентралей, вынужденных вырабатывать электроэнергию в конденсационном режиме. Действующая модель ОРЭМ не стимулирует развитие теплофикационных систем, т.к., несмотря на нахождение большинства ТЭЦ в центре нагрузок, тарифы на электроэнергию включают транспортную составляющую.

Проведенная оценка эффективности использования преимуществ внешней теплофикации показала, что когенерация, являющаяся наиболее экономичной технологией производства электрической и тепловой энергии, оказалась на сегодняшний день недостаточно эффективной.

По результатам оценки эффективности использования преимуществ внутренней теплофикации можно констатировать, что независимо от вида водоподготовительной установки, а также типа применяемых деаэраторов (атмосферные или вакуумные) для существующих схем ВПУ ТЭЦ характерны существенные потери энергоэффективности, связанные с нерациональным покрытием тепловых нагрузок этих установок.

Для многих отечественных ТЭЦ, подключенных к открытым системам теплоснабжения, характерны значительные расходы подпиточной воды теплосети. По данным Минэнерго России из 170 городов с численностью более 100 тыс. человек закрытые системы теплоснабжения применяются только в 88 городах (82 города РФ с открытыми системами теплоснабжения). Например, на ТЭЦ Санкт-Петербурга, Екатеринбурга и ряда других городов с крупными открытыми системами теплоснабжения расход подпиточной воды теплосети достигает нескольких тысяч тонн в час. При этом для подготовки подпиточной воды теплосети, как правило, применяются вакуумные деаэраторы большой производительности типа ДВ-400, ДВ-800 и ДВ-1200.

На промышленно-отопительных ТЭЦ, обеспечивающих технологическим паром крупные нефтехимические производства, расход добавочной питательной воды также измеряется тысячами тонн в час. Тепловая схема и температурный режим водоподготовки при таких больших расходах воды в значительной мере определяют тепловую экономичность всей электростанции.

В настоящее время для обеспечения тепловых нагрузок ВПУ ТЭЦ, как правило, применяются устаревшие и малоэкономичные схемы, разработанные в 60-е годы прошлого века. Основным фактором, понижающим экономичность ВПУ и ТЭЦ в целом, является практически повсеместное использование в схемах подогрева подпиточной и добавочной питательной воды высокопотенциальных отборов пара.

Проведенный анализ возможностей использования ТЭЦ в городском коммунальном хозяйстве (КХ) показал, что на территории РФ отсутствуют многоцелевые тепловые электростанции, инфраструктура которых эффективно использовалась бы не только для выработки электрической и тепловой энергии, но и оказания услуг для нужд КХ, в том числе для термической переработки отсортированных коммунальных и производственных отходов, а также утилизации вывозимого с городских улиц снега.

Таким образом, в сложившихся условиях сохранение и развитие когенерации является актуальной задачей, решение которой возможно за счет комплексного подхода к повышению эффективности теплофикационных систем путем расширения функционала городских ТЭЦ в составе единого энергетического комплекса городского коммунального хозяйства.

Во второй главе обосновывается применение новых технических и технологических решений, направленных на оптимизацию тепловых схем и режимов работы ТЭЦ, что позволяет наиболее полно использовать преимущества теплофикации в современных условиях.

Одним из решений, позволяющих повысить эффективность внутренней теплофикации на ТЭЦ, а также надежность обеспечения тепловых нагрузок водоподготовительных

установок, является использование пятого нерегулируемого отбора пара наиболее распространенной в нашей стране теплофикационной паровой турбины типа Т-100-130. Следует отметить, что предложенные технологии с использованием пятого отбора разработаны соискателем применительно к турбоустановке с турбиной типа Т-100-130, однако часть этих решений может применяться и на других паротурбинных установках Уральского турбинного завода с турбинами типа Т-50-130 и Т-175-130.

В соответствии с показанной на рисунке 1 принципиальной тепловой схемой, предлагается использование пятого нерегулируемого отбора пара турбины типа Т для подогрева греющего агента перед вакуумным деаэратором подпиточной воды теплосети. Подогрев сетевой воды, используемой в качестве греющего агента вакуумного деаэратора, осуществляется в пароводяном подогревателе до необходимой по условиям эффективной деаэрации температуры. Схема подогрева греющего агента вакуумных деаэраторов вынужденно применяются на ТЭЦ европейской части страны из-за недостаточности температуры сетевой воды для обеспечения требуемого качества вакуумной деаэрации подпиточной воды теплосети. Применение в качестве греющего теплоносителя пара пятого нерегулируемого отбора турбин тип Т позволяет отказаться от использования низкоэкономичных типовых решений, предусматривающих подогрев греющего агента вакуумных деаэраторов за счет высокопотенциального пара производственного отбора. Предложенное решение также актуально для ТЭЦ, на которых вынужденно выведены из эксплуатации турбины типа ПТ из-за отказа промышленными предприятиями от потребления пара производственного отбора.

На теплоэлектроцентралях, на которых вакуумные деаэраторы добавочной питательной воды котлов установлены на значительном удалении от паровых турбин типа Т, обосновано применение тепловой схемы, представленной на рисунке 2 а. Особенностью предложенного решения является применение пара пятого нерегулируемого отбора для подогрева общего потока деаэрированной воды после вакуумного деаэратора 4 в пароводяном теплообменнике 5. Часть деаэрированной воды (около 40 - 45 %) после пароводяного теплообменника 5 предлагается направлять в вакуумный деаэратор 4 в качестве греющего агента.

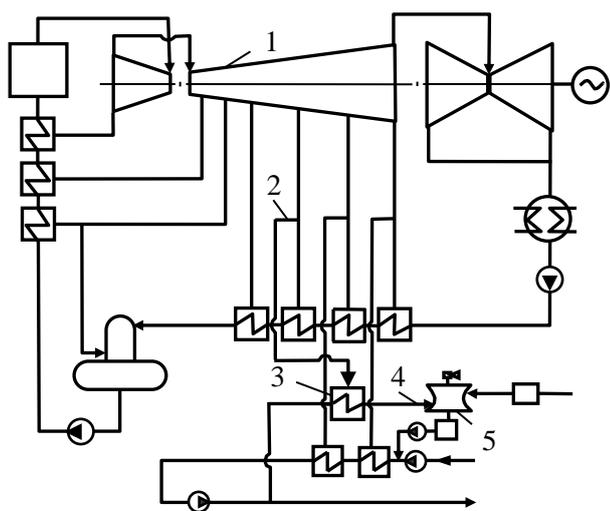


Рисунок 1 - Принципиальная схема подогрева греющего агента вакуумного деаэратора подпиточной воды теплосети (патент РФ № 2275509): 1 - теплофикационная турбина типа Т; 2 - пятый отбор пара; 3 - подогреватель греющего агента; 4 - трубопровод греющего агента; 5 - вакуумный деаэратор подпиточной воды теплосети

Для оптимизации тепловых схем с атмосферными деаэраторами добавочной питательной воды (см. рисунок 2 б) применение пятого нерегулируемого отбора пара целесообразно для подогрева обессоленной воды перед деаэрацией.

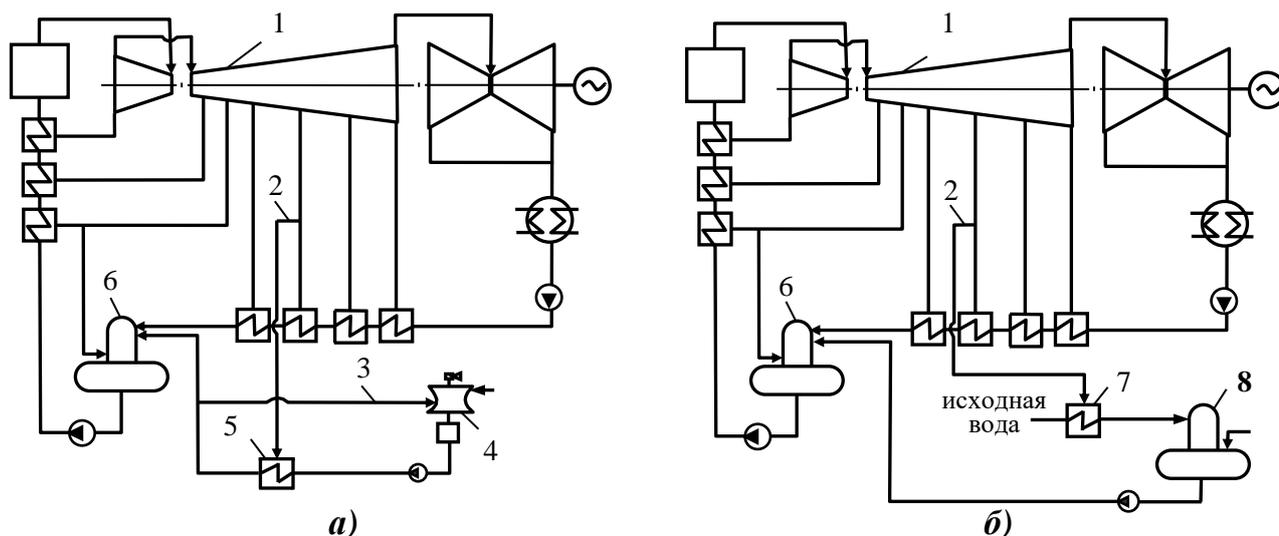


Рисунок 2 - Принципиальные схемы деаэрации добавочной питательной воды (патенты РФ №№ 2287699, 2293852): 1 - теплофикационная турбина типа Т; 2 - пятый отбор пара; 3 - трубопровод греющего агента; 4 - вакуумный деаэратор; 5 - подогреватель добавочной питательной воды; 6 - деаэратор повышенного давления; 7 - подогреватель исходной воды; 8 - атмосферный деаэратор

Применение пятого нерегулируемого отбора теплофикационных турбин типа Т с целью повышения эффективности внутренней теплофикации не ограничивается только схемами ВПУ ТЭЦ.

На тепловых электростанциях, на которых предусмотрено применение мазута в качестве резервного топлива, использование пара пятого отбора турбин типа Т целесообразно как для предварительного подогрева воздуха перед воздухоподогревателями паровых котлов (патент РФ № 2287701), так и для подогрева мазута в резервуарах при его хранении.

Для оценки режимных параметров теплофикационных турбин Т-100/120-130, обеспечивающих необходимый для реализации разработанных технических решений регулировочный диапазон изменения давления пара в камере пятого нерегулируемого отбора, проведены натурные испытания на двух турбоустановках с турбинами Т-100/120-130-2 и Т-100/120-130-3. Критерием применимости разработанных технологий с использованием пара пятого отбора турбин типа Т является наличие избыточного давления в данном отборе в регулировочном диапазоне, обеспечивающим надежную и экономичную работу турбоагрегата.

Программа испытаний каждой турбины состояла из 2-х серий опытов: I серия - опыты с включенным нижним теплофикационным отбором при одноступенчатом подогреве сетевой воды; II серия - опыты с включенным верхним теплофикационным отбором при двухступенчатом подогреве сетевой воды.

Испытания показали, что изменение давления в предлагаемом источнике теплоты зависит от двух факторов: 1) расхода свежего пара; 2) теплофикационной нагрузки (давления пара в теплофикационных отборах). При работе турбоагрегатов в теплофикационном режиме дополнительным фактором, оказывающим влияние на давление пара в рассматриваемом отборе, имеет режим эксплуатации турбины (по электрическому или тепловому графикам).

Для выявления связи между независимой (фактор) и зависимой (результативный признак) величинами, а также определения аналитического выражения этой взаимосвязи

был применен регрессионный анализ. Полученные уравнения регрессии, описывающие зависимость параметров пара в 5-м отборе турбины Т-100/120-130-3 от расхода свежего пара (X_1) и давления пара в теплофикационном отборе (X_2) для различных режимов работы турбоагрегата, имеют вид:

$$Y_1 = 0,0517 + 0,0007K_n X_1 - 0,9858X_2, \quad (1)$$

где Y_1 - давление пара в 5-ом отборе, МПа, при одноступенчатом подогреве сетевой воды (ОПСВ) и работе ТА по электрическому графику; K_n - коэффициент поправки к расходу свежего пара, определяемый по типовой энергетической характеристике турбоагрегата типа Т-100/120-130 при отклонении давления и температуры свежего пара от номинальных значений;

$$Y_2 = -0,0599 + 0,0006K_n X_1 + 0,5746X_2, \quad (2)$$

где Y_2 - давление пара в 5-ом отборе, МПа, при двухступенчатом подогреве сетевой воды (ДПСВ) и работе ТА по тепловому графику.

Проведенное расчетно-экспериментальное исследование показало, что при работе турбины типа Т-100/120-130 с включенным теплофикационным отбором и использованием пара из пятого нерегулируемого отбора сверх отбора на регенерацию необходимо учитывать по какому из графиков (электрическому или тепловому) эксплуатируется турбоагрегат (ТА). Так, в случае работы ТА по электрическому графику нагрузок для обеспечения избыточного давления в пятом отборе необходимо увеличивать расход свежего пара одновременно с увеличением тепловой нагрузки. Установлено, что для наиболее часто встречающихся в эксплуатации теплофикационных режимов при работе турбоагрегата по электрическому графику, расход свежего пара на турбину Т-100/120-130, обеспечивающий избыточное давление в пятом отборе, должен составлять не менее 200 т/ч, а электрическая мощность – около 50 МВт.

Для повышения тепловой экономичности теплоэлектроцентралей, подключенных к открытым системам теплоснабжения, предложен усовершенствованный режим работы ВПУ подготовки подпиточной воды теплосети, в соответствии с которым в часы максимального электропотребления при наибольшем расходе пара в конденсаторы паровых турбин подпиточную воду теплосети накапливают в существующих баках-аккумуляторах за счет увеличения пропуска исходной подпиточной воды теплосети через встроенный пучок конденсатора паровой турбины. В часы снижения электрической мощности накопленную в баках-аккумуляторах подпиточную воду теплосети направляют в обратный трубопровод теплосети перед сетевыми подогревателями с одновременным снижением расхода исходной подпиточной воды теплосети через встроенный пучок конденсатора паровой турбины.

В современных экономических условиях необходимость использования баков-аккумуляторов на ТЭЦ перестала быть актуальной в связи существенным сокращением потребления воды ГВС (в 2 - 3 раза). При этом на большинстве ТЭЦ сохраняются и поддерживаются в исправном состоянии избыточные аккумулирующие емкости. Предложенный режим работы позволяет сохранить полезную емкость баков-аккумуляторов для дальнейшего их заполнения в часы, приходящиеся на период несения ТЭЦ максимальной электрической нагрузки. Основными преимуществами предложенного режима работы ВПУ ТЭЦ являются: повышение выработки электроэнергии на тепловом потреблении в часы несения станцией максимальной электрической мощности; возможность

обеспечения требуемого подогрева исходной подпиточной воды теплосети перед декарбонизацией и вакуумной деаэрацией (до 30 - 35 °С) за счет отработавшего пара турбин, т.е. с максимальной тепловой экономичностью.

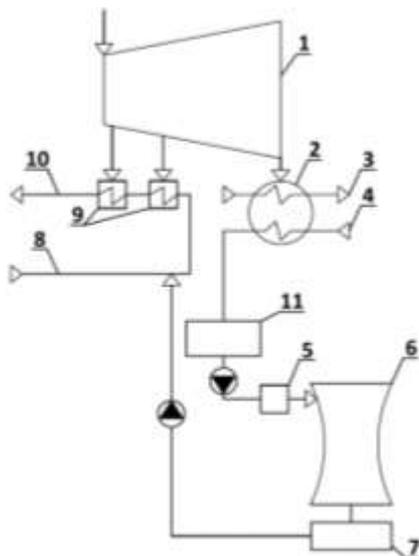


Рисунок 3 - Принципиальная схема работы баков-аккумуляторов подпиточной воды теплосети ВПУ с установками умягчения (патент РФ № 164974): 1 - паровая турбина; 2 - конденсатор паровой турбины; 3 - трубопровод охлаждающей технической воды; 4 - трубопровод исходной подпиточной воды теплосети; 5 - установка умягчения; 6 - вакуумный деаэрактор подпиточной воды теплосети; 7 - баки запаса уровня; 8 - обратный трубопровод сетевой воды; 9 - сетевые подогреватели; 10 - подающий трубопровод сетевой воды; 11 - аккумулирующая емкость

Предложенный режим работы ВПУ легко реализуется на ТЭЦ, не использующих установок умягчения подпиточной воды теплосети и ограничивающихся вакуумной деаэрацией совместно с вводом ингибиторов коррозии (комплексонов). При этом для исключения снижения качества деаэрации в переменных режимах целесообразно обеспечивать загрузку вакуумных деаэракторов в диапазоне 30 - 60 % от номинала.

Для водоподготовительных установок, использующих умягчение подпиточной воды, предложена представленная на рисунке 3 схема ТЭЦ, в которой аккумулирующую емкость включают в трубопровод исходной подпиточной воды теплосети между конденсатором и установкой умягчения воды.

Следует отметить, что усовершенствованный режим работы ВПУ ТЭЦ рекомендуется реализовывать с использованием одной или нескольких выделенных турбин, конденсаторы которых охлаждаются только исходной подпиточной водой теплосети. Такой режим работы станции позволяет обеспечить максимальную выработку электроэнергии на тепловом потреблении.

Основным критерием промышленной применимости нового режима работы ВПУ является возможность своевременной разрядки аккумуляторных баков. На основе статистических данных проведено исследование режимов работы действующей электростанции (УлТЭЦ-1), по результатам которого смоделированы новые режимы использования баков-аккумуляторов подпиточной воды теплосети для характерных периодов года: отопительного, переходного и неотапительного (рисунки 4 - 6).

Из рисунков 4 - 6 видно, что процесс заполнения происходит в течение 11 - 12 часов, объем подпиточной воды, аккумулированной на станции за это время, составляет около 5 000 м³ при полезной емкости установленных АБ 21 600 м³. В зонах разрядки, которые приходятся на часы несения станцией минимальной электрической нагрузки, происходит снижение расхода исходной подпиточной воды теплосети с одновременным опорожнением баков-аккумуляторов.

Проведенное исследование режимов работы ВПУ на примере УлТЭЦ-1 подтверждает возможность реализации и тиражирования новой технологии энергоэффективного

использования баков-аккумуляторов подпиточной воды теплосети в открытых системах теплоснабжения.

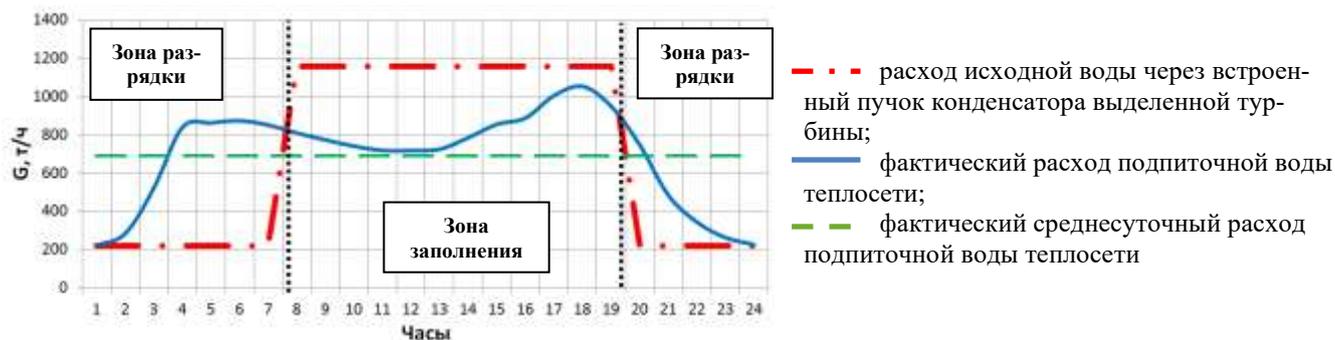


Рисунок 4 - Режим использования баков-аккумуляторов (неотапительный период)

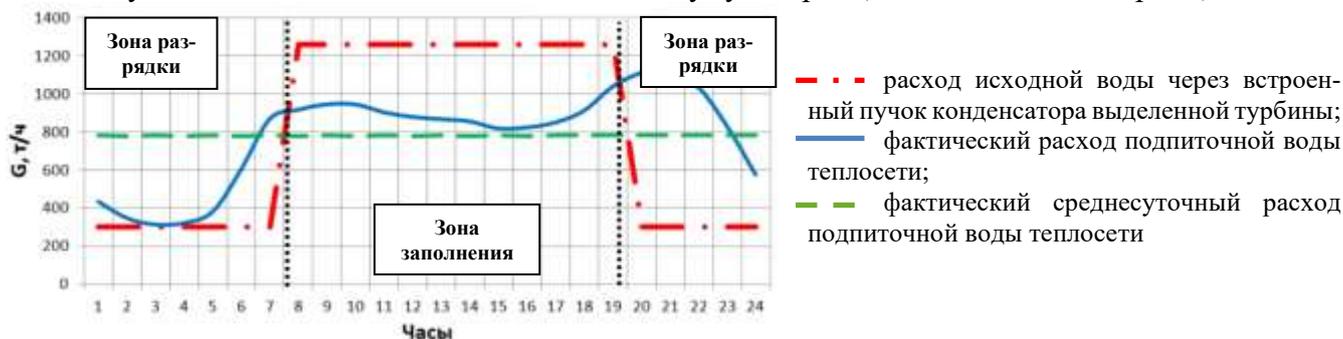


Рисунок 5 - Режим использования баков-аккумуляторов (переходный период)

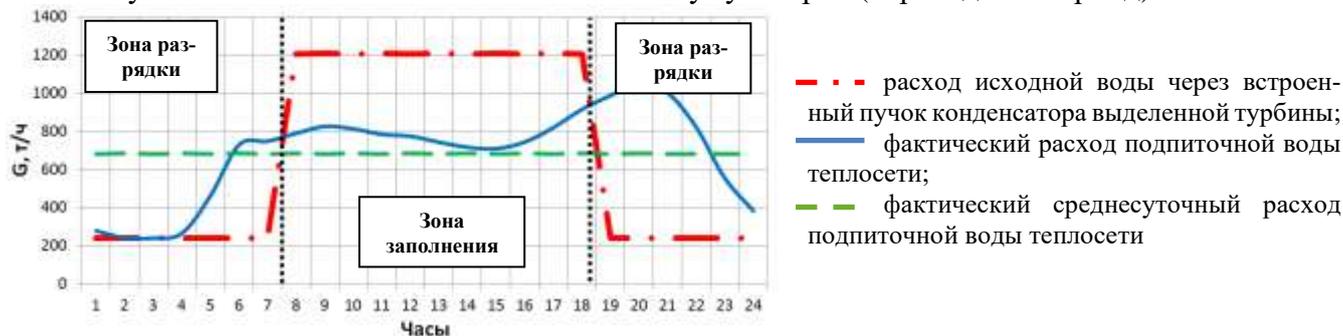


Рисунок 6 - Режим использования баков-аккумуляторов (отапительный период)

В третьей главе представлено обоснование возможности и целесообразности применения дополнительного источника энергии - мини-ГЭС на насосно-дресселирующих станциях (НДС) теплофикационных систем.

Проведенное исследование теплофикационных систем ряда крупных городов Российской Федерации показало, что для надежного теплоснабжения потребителей при наличии разности геодезических отметок между ТЭЦ и районом теплоснабжения, как правило, применяются насосно-дресселирующие станции (НДС), особенностью эксплуатации которых является существенный перепад давлений и значительный расход теплоносителя в обратном трубопроводе сетевой воды. Например, на НДС г. Ульяновска перепад давлений обратной сетевой воды, обеспечиваемый работой регулятора подпора, составляет в среднем 0,4 МПа, а расход сетевой воды – около 1000 т/ч (см. таблицу 1).

Таблица 1 - Результаты замеров параметров сетевой воды на насосно-дресселирующих станциях

| № | СН в работе | Параметры со стороны ТЭЦ | | | | Напор насоса, МПа | Ленинский район города | | | |
|-------|-------------|--------------------------|----------------------|---------------------|---------------------|-------------------|------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | | P ₁ , МПа | P ₂ , МПа | t ₁ , °С | t ₂ , °С | | P ₁ , МПа | P ₂ , МПа | G ₁ , т/ч | G ₂ , т/ч |
| НДС-1 | СН-4 | 0,58 | 0,14 | 69,0 | 47,0 | 1,37 | 0,85 | 0,5 | 300 | 990 |
| НДС-5 | СН-2 | 0,88 | 0,23 | 69,0 | 44,0 | 13,6 | 1,3 | 0,65 | 1140 | 1000 |
| НДС-7 | СН-4 | 0,78 | 0,1 | 69,0 | 41,0 | 1,45 | 1,25 | 0,6 | 1185 | 275 |

Следует отметить, что создание подпора в обратном трубопроводе обусловлено необходимостью обеспечения давления в обратном трубопроводе, исключающем опорожнение системы отопления потребителей с наибольшими геодезическими отметками. В качестве основного направления энергосбережения предложено использовать столь значительный перепад давлений в обратном трубопроводе на мини-ГЭС (патент РФ № 139299), что позволяет обеспечить дополнительную выработку электроэнергии для собственных нужд (0,4 кВт или 6,3 кВт).

На примере централизованной системы теплоснабжения г. Ульяновска предложены схемы интеграции гидроагрегатов мини-ГЭС с основным оборудованием насосно-дресселирующих станций. Монтаж гидроагрегатов предполагается осуществлять параллельно основной схеме регулирования с регулятором подпора (см. рисунок 7).

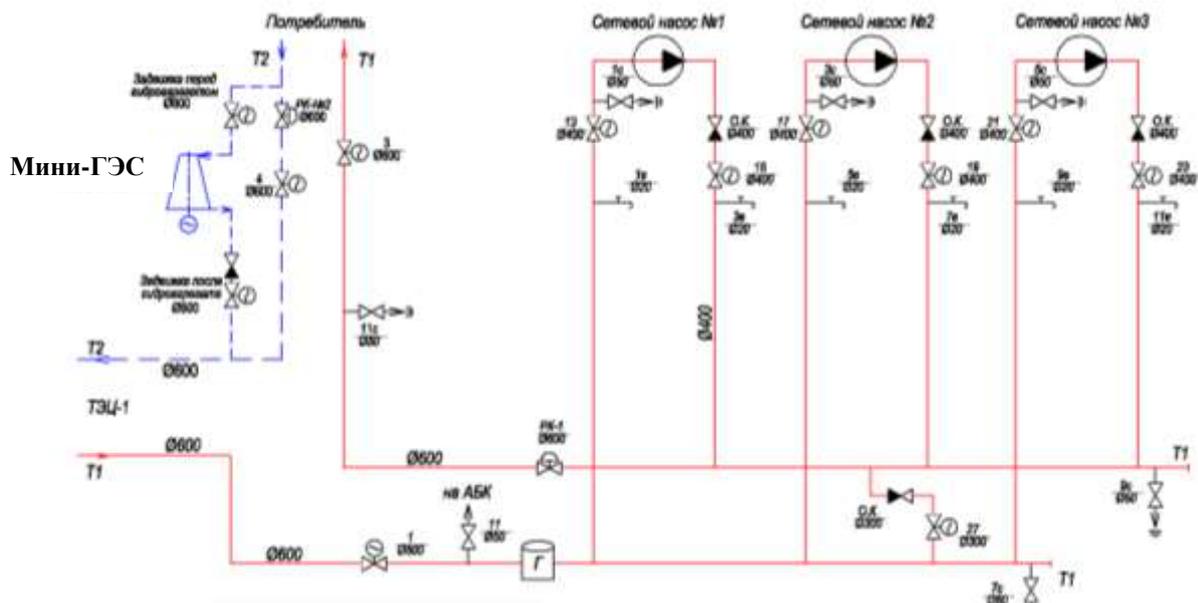


Рисунок 7 - Принципиальная схема подключения установки мини-ГЭС (патент РФ № 139299)

Расчет мощности мини-ГЭС произведен в соответствии с параметрами сетевой воды, приведенными в таблице 1. Из уравнения материального баланса определены расходы воды, направляемой помимо гидроагрегата для обеспечения расчетного давления в обратном трубопроводе (0,23 МПа на НДС-5; 0,14 МПа на НДС-1). Так, для НДС-5 потребуется байпасировать 35 % общего расхода воды, на НДС-1 - 28 %.

Мощность мини-ГЭС, кВт, оценивалась по формуле

$$N = 9,81HG\eta_{ГЭС}, \quad (3)$$

где H - располагаемый (рабочий) напор на гидротурбине, м в. ст.; G - расход воды через гидротурбину, кг/с; $\eta_{ГЭС}$ - коэффициент, учитывающий КПД гидротурбины и генератора.

Проведенные расчеты показывают, что для условий работы насосно-дресселирующей станции НДС-5 мощность мини-ГЭС составит 55,6 кВт, для НДС-1 - 51,5 кВт.

Оценить потенциал энергосбережения при внедрении мини-ГЭС на НДС позволяет диаграмма представленная на рисунке 8. Зная перепад давлений на регуляторе подпора НДС, а также расход сетевой воды по обратному трубопроводу легко определить теоретическую электрическую мощность мини-ГЭС.

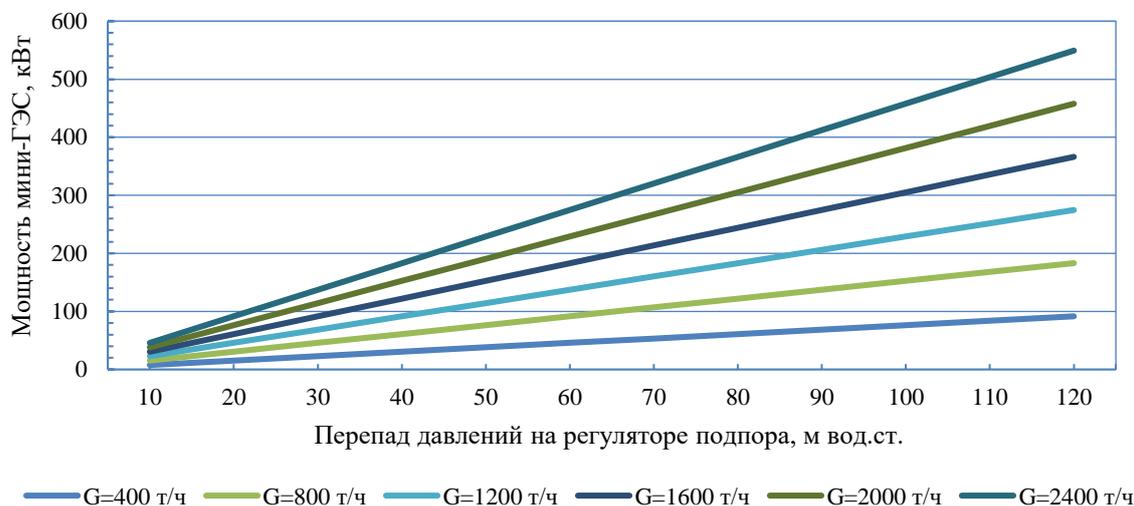


Рисунок 8 - Мощность мини-ГЭС в зависимости от расхода воды и перепада давлений

Результаты проведенного расчета экономической эффективности внедрения мини-ГЭС на НДС, представленные в таблице 2, показали, что дисконтированный срок окупаемости для условий НДС-1 и НДС-5 г. Ульяновска превышает 5 лет.

Таблица 2 - Экономические показатели реализации проекта мини-ГЭС

| Показатель | Ед. измерения | Значения | |
|-------------------------------------|---------------|-------------------|-------------------|
| | | для условий НДС-1 | для условий НДС-5 |
| Ставка дисконтирования | % | 18 | 18 |
| Инвестиции в ценах 2023 г. | тыс. руб. | 8690,00 | 8690,00 |
| Чистый дисконтированный доход (NPV) | тыс. руб. | 4999,02 | 6083,39 |
| Внутренняя норма доходности (IRR) | % | 12 | 14 |
| Дисконтированный срок окупаемости | лет | 5,7 | 5,3 |

Основной причиной низкой экономической эффективности проекта является стоимость внедрения мини-ГЭС, складывающаяся из затрат на изготовление агрегата в составе гидротурбины (например, диагональной типа ПрД55-Г-20), генератора, системы автоматического управления. Высокая стоимость агрегатов мини-ГЭС обусловлена мелкосерийным производством установок такого типа.

С целью снижения сроков окупаемости проектов с установкой мини-ГЭС на НДС предлагается применение в качестве основного оборудования незначительно модернизированных обращенных насосных агрегатов, например, типа СЭ 1250-70 или Д 1250-63. По предварительным расчетам, дисконтированный срок окупаемости разработанных мини-ГЭС на базе обращенных насосных агрегатах составит 3 - 4 года при незначительном снижении КПД на 5 - 7%.

С учетом распространенности насосно-дресселирующих станций в централизованных системах теплоснабжения, объем рынка в масштабах страны оценивается в несколько сотен мини-ГЭС, предназначенных для рекуперации избыточного давления воды в обратном трубопроводе теплосети.

В четвертой главе выполнен сравнительный анализ предложенных технологий использования низкопотенциальных источников теплоты ТЭЦ для утилизации вывозимого с городских улиц снега.

На сегодняшний день лидером по количеству используемых снегоплавильных установок (СУ) является г. Москва. Согласно статистическим данным более 25 % от объема снега, вывозимого с улиц г. Москвы, утилизируется на снегоплавильных установках, работающих на дизельном топливе, а затраты на утилизацию снега в г. Москва составляют порядка 1,8 млрд руб./год (в ценах 2018 года).

Проведенный анализ ранее реализованных, а также предлагаемых для реализации технических и технологических решений по утилизации вывозимого с городских улиц снега показал, что на сегодняшний день отсутствуют энергоэффективные решения, позволяющие использовать энергетический потенциал ТЭЦ для решения проблемы утилизации снега.

Основными преимуществами использования ТЭЦ для утилизации снега являются: транспортная доступность, связанная с размещением большинства ТЭЦ в черте города; наличие резервов источников низкопотенциальной теплоты, пригодных для утилизации снега; наличие систем водоподготовки и обученного эксплуатационного персонала.

Утилизацию снега в стационарных установках предлагается производить в снегоплавильной камере, представляющей собой железобетонный резервуар с установленным внутри поверхностным теплообменником, в который направляют низкопотенциальные источники теплоты от ТЭЦ, например: основной конденсат турбины; конденсат сетевых подогревателей; обратную сетевую воду. Также возможен контактный способ утилизации снега за счет подачи в снегоплавильную камеру циркуляционной воды после конденсаторов турбин ТЭЦ.

Проведенный сравнительный анализ тепловой экономичности предложенных для утилизации снега источников низкопотенциальной теплоты от ТЭЦ, выполненный по величине удельной выработки электроэнергии, отнесенной к одной тонне утилизируемого снега, показал, что наибольшей энергетической эффективностью обладают схемы с использованием теплоты циркуляционной воды после конденсаторов турбин и теплоты обратной сетевой воды (см. таблицу 3).

Таблица 3 - Удельная выработка электроэнергии для технологий утилизации снега

| № | Используемый теплоноситель | Удельная выработка электроэнергии, кВт·ч/т |
|--|--|--|
| СУ производительностью 65 тонн снега в час | | |
| 1 | Основной конденсат турбин после ПНД-1 | 40 |
| 2 | Основной конденсат турбин после ПНД-2 | 35 |
| 3 | Основной конденсат турбин после ПНД-3 | 32 |
| 4 | Конденсат нижнего сетевого подогревателя | 38 |
| 5 | Конденсат верхнего сетевого подогревателя | 34 |
| СУ производительностью 650 тонн снега в час | | |
| 1 | Теплота обратной сетевой воды | 56 |
| 2 | Теплота циркуляционной воды после конденсаторов турбин | 60 |

Основным недостатком решений с использованием в качестве греющей среды основного конденсата турбины и конденсата сетевых подогревателей является незначительная производительность СУ (до 65 т/ч снега), не позволяющая достаточно эффективно использовать потенциал ТЭЦ для утилизации вывозимого с городских улиц снега.

Наибольшая энергетическая эффективность для СУ производительностью до 650 тонн снега в час (см. таблицу 3) достигается при использовании теплоты циркуляционной воды после конденсаторов турбин, однако, учитывая основные недостатки контактного способа утилизации снега на ТЭЦ, а именно: необходимость установки водоочистных сооружений большой мощности для очистки общего потока воды после снегоплавильной камеры; ограниченную сферу применения из-за работы ТЭЦ с минимальной конденсационной нагрузкой в зимний период; необходимость консервации градирен с возможностью быстрого их ввода в эксплуатацию при загрузке ТЭЦ на максимальную электрическую мощность, к реализации предлагается решение с применением в снегоплавильной установке обратной сетевой воды (см. рисунок 9).

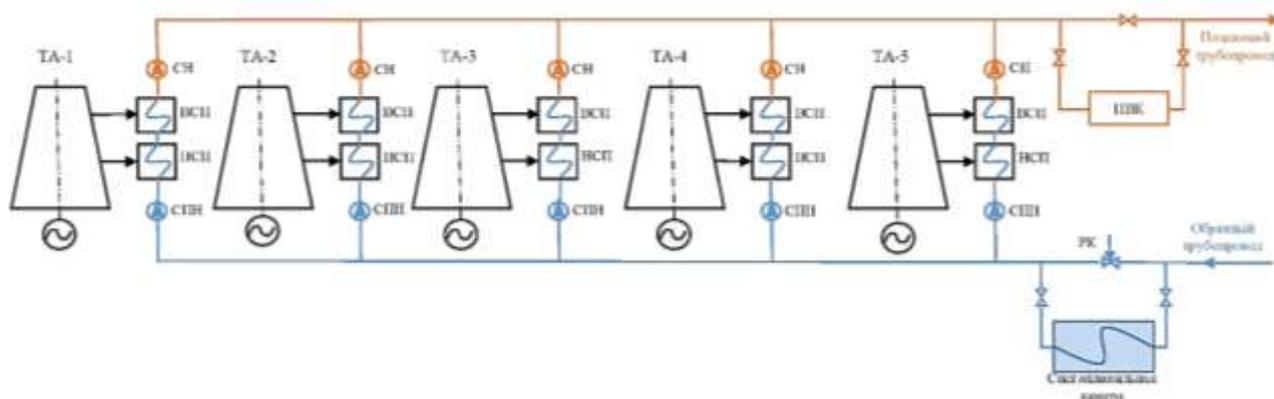


Рисунок 9 – Принципиальная схема использования обратной сетевой воды для утилизации снега на ТЭЦ (патент РФ № 165483): ТА-1 – ТА-5 – установленные на ТЭЦ турбоагрегаты; НСП и ВСП – нижний и верхний сетевые подогреватели; СПН – сетевые (подпорные) насосы 1-го подъема; СН – сетевые насосы 2-го подъема; ПВК – пиковая водогрейная котельная; РК – регулятор расхода, обеспечивающий требуемый расход обратной сетевой воды через теплообменник СУ

Предлагаемая схема подключения теплообменника снегоплавильной установки позволяет отбирать часть возвращаемой на ТЭЦ обратной сетевой воды для целей утилизации снега и после использования в СУ смешивать с общим потоком обратной сетевой воды. Как правило, температура возвращаемой на ТЭЦ обратной сетевой воды превышает нормативную температуру по утвержденному графику на 4 – 6 °С, что в свою очередь снижает тепловую экономичность теплофикационных турбин. Реализация предложенной схемы подключения СУ, представленной на рисунке 9, позволяет снизить температуру возвращаемой на ТЭЦ обратной сетевой воды до нормативного значения.

Для оценки применимости на ТЭЦ предложенной технологии утилизации снега с использованием в качестве греющей среды обратной сетевой воды выполнен расчет эффективности инвестиций применительно к условиям города Ульяновска (см. таблицу 4). В расчете учтены нормативные климатические данные по количеству выпадающего снега, а также расходы на вывоз убираемого с улиц снега на «сухую» снегосвалку, расположенную в пригороде Ульяновска (село Баратаевка). Единичная производительность снегоплавильной установки 650 т/ч позволяет утилизировать снег, вывозимый с улиц двух районов города: Ленинского и Засвияжского (см. таблицу 5).

Таблица 4 - Экономические показатели проекта утилизации снега в г. Ульяновске

| Показатель | Использование теплоты обратной сетевой воды |
|---|---|
| Экономия условного топлива, млн руб., без НДС | 70,510 |
| Экономия топлива на перевозку снега составляет, млн руб., без НДС | 125,382 |
| Капитальные и эксплуатационные затраты, млн руб., без НДС | 416,683 |
| ЧДД, млн руб. | 328,751 |
| Внутренняя норма доходности, % | 17 |
| Дисконтированный срок окупаемости при ставке 18%, лет | 4,81 |

Таблица 5 – Объемы вывозимого снега в г. Ульяновске

| Район города | Площадь района, км ² | Площадь, убираемой территории, м ² | Объем вывозимого снега, м ³ /сезон | Объем снега, м ³ /сутки |
|-----------------|---------------------------------|---|---|------------------------------------|
| Заволжский | 99,8 | 14970000 | 2694600 | 29940 |
| Железнодорожный | 74 | 11100000 | 1998000 | 22200 |
| Ленинский | 37,1 | 5565000 | 1001700 | 11130 |
| Засвияжский | 106 | 15900000 | 2862000 | 31800 |
| Всего | 316,9 | 47535000 | 8556300 | 95070 |

Анализ представленных в таблице 4 данных показывает, что основной эффект достигается за счет снижения затрат дизельного топлива на перевозку снега (125,382 млн руб.), т.к. для г. Ульяновска «плечо» вывоза снега при использовании площадки УлТЭЦ-1 вместо «сухой» снегосвалки снижается на 16 км. В случае расположения ТЭЦ на сопоставимом со снегосвалкой расстоянии окупаемость проекта только за счет повышения тепловой экономичности не будет обеспечена.

С целью снижения капитальных затрат при реализации новой технологии утилизации снега на ТЭЦ за счет теплоты обратной сетевой воды разработаны рекомендации, позволяющие обеспечить окупаемость таких проектов.

Наиболее простым и обоснованным решением при использовании для плавления снега обратной сетевой воды является сооружение снегоплавильных установок не на территории ТЭЦ, а на городских площадках вблизи магистральных трубопроводов тепловых сетей. Такое решение позволит размещать СУ в непосредственной близости от убираемых от снега городских территорий и, соответственно, существенно снизить затраты на перевозку снега автотранспортом.

При проектировании снегоплавильных установок на территории городских ТЭЦ для снижения капитальных затрат рекомендуется выбирать производительность СУ с учетом возможности складирования вывозимого с городских улиц снега перед утилизацией. Как правило, на большинстве ТЭЦ имеются значительные территории, не задействованные в производственном процессе.

Рекомендации по снижению капитальных затрат на СУ были учтены при оценке окупаемости проекта, предложенного для реализации на площадке Тольяттинской ТЭЦ (ТоТЭЦ) в г. Тольятти. Площадь территории Тольяттинской ТЭЦ превышает 90 га, что позволяет складировать снег перед утилизацией. Снижение производительности СУ более чем в два раза по сравнению с расчетной величиной (до 300 т/ч) позволила снизить капитальные затраты на 45 % и обеспечить дисконтированный срок окупаемости проекта в течение 3,6 года. В расчете учтено увеличение продолжительности работы СУ за сезон с 90 до 150 дней за счет возможности складирования снега.

Следует отметить, что при расчете эффективности инвестиций не учитывались платежи за утилизацию принимаемого на УлТЭЦ-1 и ТоТЭЦ снега.

Взаимовыгодное сотрудничество муниципальных образований с энергокомпаниями возможно при условии, что цена утилизации 1 м^3 снега на ТЭЦ, будет ниже стоимости вывоза снега на «сухую» снегосвалку или городскую снегоплавильную установку. Применительно к г. Ульяновску разница в стоимости вывоза снега на сухую» снегосвалку в с. Баратаевка (существующая схема) и УлТЭЦ-1 составляет 125,382 млн руб. за сезон. С учетом дисконта в размере 20% от разницы в стоимости вывоза снега рассчитана возможная стоимость платежа за его утилизацию на УлТЭЦ-1, которая составила 25 руб. за 1 м^3 (в ценах 2023 г.). С учетом утилизации на УлТЭЦ-1 около 4,0 млн м^3 снега, принимаемого по тарифу 25 руб./ м^3 , выручка энергокомпании за сезон может составить около 100 млн руб.

Таким образом, с учетом платежей за плавление снега, технология использования теплоты обратной сетевой воды для утилизации снега на ТЭЦ имеет хорошие перспективы коммерциализации.

В **пятой главе** обосновывается возможность применения отработавшего пара турбин ТЭЦ в схемах подготовки воды для целей централизованного холодного водоснабжения (ХВС). В зависимости от близости ТЭЦ и водопроводных очистных сооружений (ВОС) предложены две технологии подогрева холодной воды.

Для реализации первой разработанной и запатентованной технологии регулируемого (до 20 - 30 °С) подогрева питьевой воды предлагается установка мини-ТЭЦ на территории или в непосредственной близости от водоочистных сооружений водоканала. При проектировании и новом строительстве водоочистных сооружений целесообразно рассмотреть возможность установки паротурбинных установок мини-ТЭЦ. Воду после насосной станции первого подъема направляют в качестве охлаждающей среды в конденсатор паровой турбины мини-ТЭЦ перед водоочисткой (см. рисунок 10). Реализация предложенной технологии позволяет максимально увеличить выработку электроэнергии на тепловом потреблении за счет использования отработавшего пара турбин в технологическом цикле подготовки питьевой воды, а также повысить эффективность водоочистки за счет интенсификации процессов осветления и коагуляции воды и снижения расхода реагентов в два и более раза, т.е. получить системный эффект.

В случае расположения действующих ТЭЦ на значительном расстоянии от водоочистных сооружений водоканала, предлагается осуществлять регулируемый (до 20 °С) подогрев питьевой воды системы централизованного ХВС во встроенном пучке конденсатора выделенной паровой турбины (см. рисунок 11).

Одним из основных преимуществ предложенной технологии применения отработавшего пара турбин ТЭЦ в схемах подготовки воды для целей ХВС является существенное повышение тепловой экономичности электростанции, достигаемое за счет увеличения выработки электроэнергии на тепловом потреблении при одновременном снижении расхода теплоты на подогрев воды системы горячего водоснабжения (ГВС). В закрытых системах теплоснабжения снижение расхода теплоты достигается за счет использования у потребителей для приготовления горячей воды более теплой исходной питьевой воды, подогретой на ТЭЦ до 20 °С. Пониженный расход ГВС в открытых систем теплоснабжения обеспечивается за счет уменьшения количества горячей воды, используемой потребителями, при ее смешении в водоразборных устройствах.

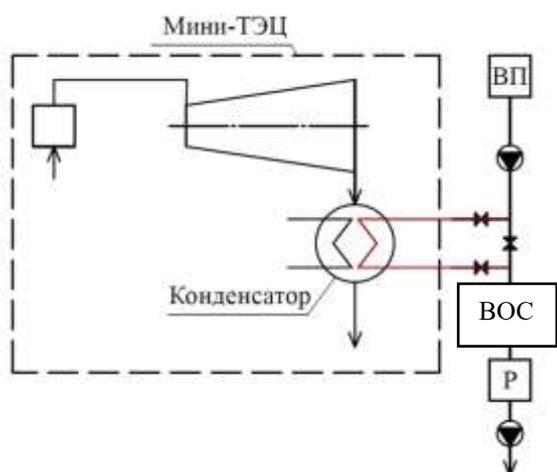


Рисунок 10 - Принципиальная схема применения отработавшего пара турбины мини-ТЭЦ на ВОС (патент РФ № 165933)

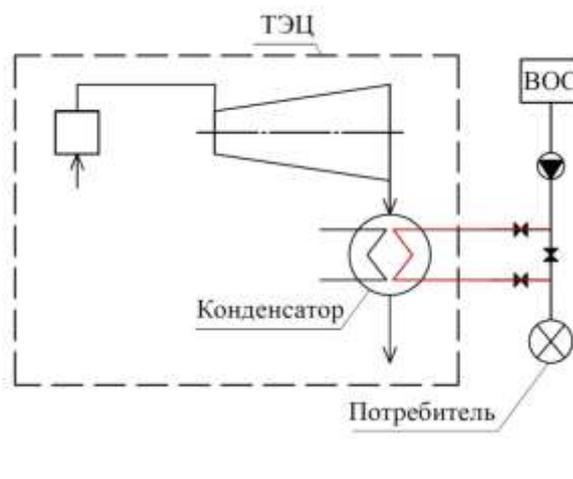


Рисунок 11 - Принципиальная схема применения отработавшего пара турбины ТЭЦ в системе централизованного водоснабжения

Новая схема достаточно просто реализуется на ТЭЦ, подключенных к открытым системам теплоснабжения, на которых существует несколько резервных вводов питьевой воды достаточного диаметра. Один из вводов может быть задействован для подачи питьевой воды на ТЭЦ, а второй ввод - для транспортирования уже подогретой до 20 °С воды в централизованную систему ХВС. Реализация предложенной схемы потребует изменение режимов ТЭЦ, а также отключение основного пучка конденсатора выделенной турбины. При загрузке электростанции по электрической мощности в первую очередь должна нагружаться выделенная турбина за счет увеличения пропуска пара в конденсатор.

Для оценки энергетической эффективности изменений режима работы ТЭЦ, связанного с внедрением регулируемого подогрева питьевой воды, применена методика, предусматривающая использование в качестве критерия тепловой экономичности величины удельной выработки электроэнергии на тепловом потреблении.

Применительно к реальным условиям работы ТЭЦ ВАЗа экономический эффект от применения новой технологии составляет более 6000 тонн условного топлива в год. В расчете учитывалось, что предложенная схема эксплуатируется в течение 8 месяцев (кроме летних месяцев и сентября), а среднечасовой расход питьевой воды через конденсатор выделенной турбины составляет 1300 м³/ч.

Учтены фактические данные по температурам питьевой воды для различных месяцев года, а также снижение тепловой экономичности из-за уменьшения мощности отопительных отборов паровых турбин, обусловленной применением более теплой питьевой воды для ГВС. Проведенные расчеты показывают, что дисконтированный срок окупаемости рассматриваемой технологии для действующей ТЭЦ не превышает 5 лет (см. таблицу 6).

Таблица 6 - Экономические показатели реализации проекта на ТЭЦ ВАЗа

| Показатель | Ед. измерения | Значения |
|-------------------------------------|---------------|----------|
| Ставка дисконтирования | (%) | 18 |
| Инвестиции в ценах 2023 г. | тыс. руб. | 54872 |
| Чистый дисконтированный доход (NPV) | тыс. руб. | 63271 |
| Внутренняя норма доходности (IRR) | (%) | 23 |
| Дисконтированный срок окупаемости | лет | 4,26 |

В шестой главе рассматриваются технические и технологические решения, направленные на эффективную термическую переработку коммунальных и производственных отходов с использованием инфраструктуры ТЭЦ.

Практически в каждом крупном городе России с численностью населения более 300 тыс. человек установлены ТЭЦ (по данным Росстата городов в РФ с такой численностью населения более 60). Это является конкурентным преимуществом нашей страны при реализации проектов, направленных на эффективную термическую переработку коммунальных и производственных отходов с использованием инфраструктуры ТЭЦ.

Учитывая, что в Российской Федерации началось внедрение системы раздельного сбора коммунальных и производственных отходов (напроект «Экология»), можно с уверенностью рассчитывать на реализацию проектов, направленных на переработку вторичного сырья отходов, в частности, пластика в производственных масштабах, используя инфраструктуру городских ТЭЦ. Пластик - это самая распространенная категория отходов, контейнеры для его раздельного сбора имеются в 97 крупных городах России, при этом количество таких городов постоянно увеличивается.

Для термической переработки пластика на ТЭЦ предложена технология, предусматривающая использование отборного пара турбин в экструзионных установках (см. рисунок 12).

Особенностью предложенного решения является использование пара отопительного или производственного отбора с температурами 100 - 300 °С в качестве греющей среды в экструдерах, размещаемых на городских ТЭЦ или в непосредственной близости от них.

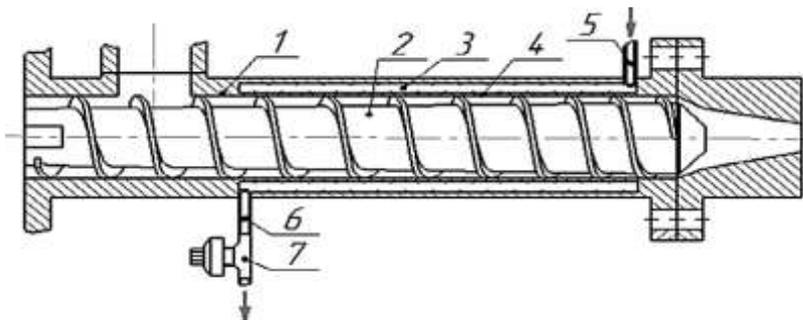


Рисунок 12 - Узел термической переработки пластика (патент РФ № 193148): 1 - корпус экструзионной установки; 2 - шнек; 3 - нагреватель, выполненный в виде полого цилиндра; 4 - зона плавления; 5 - патрубок подвода пара; 6 - патрубок отвода конденсата; 7 - конденсатоотводчик

Для основных видов пластика температура плавления находится в диапазоне от 100 °С до 270 °С, что позволяет применять в качестве греющего агента пар отопительного или производственного отборов турбин ТЭЦ.

В настоящее время на большинстве ТЭЦ имеются значительные резервы тепловой мощности в паре производственного и отопительного отборов.

Основными преимуществами предлагаемого решения являются: снижение расходов на логистику, так как городские ТЭЦ находятся в центре образования отходов пластмасс; увеличение выработки электроэнергии на тепловом потреблении из-за дополнительного отбора пара для термической переработки пластика; возможность переработки любых типов пластмасс с различной температурой плавления; увеличение скорости термической переработки пластика за счет возможности сооружения установок с большой единичной мощностью.

В соответствии с Территориальной схемой обращения с отходами Ульяновской области содержание пластика в ТКО составляет 13,31 %. С учетом раздельного сбора и

приема на специальных пунктах можно выделить для дальнейшей переработки около 20 % пластика. Для городского населения Ульяновской области, составляющего 936383 человека предполагаемый объем подлежащего переработке пластика составляет 9 970 тонн в год.

В региональном разрезе наиболее целесообразна установка экструдеров для переработки пластика на площадке Ульяновской ТЭЦ-1. В сравнении с традиционным электрическим нагревом применение в качестве греющей среды отборного пара турбин позволяет экономить 542 руб. с одной тонны перерабатываемых отходов пластмасс (при использовании пара производственного отбора).

По предварительным расчетам, основной экономический эффект от реализации проекта переработки пластика на ТЭЦ для условий города Ульяновска и прилегающих населенных пунктов складывается от реализации вторичного переработанного пластика в виде гранул. С учетом разности в стоимости между отходами пластмасс и вторичного переработанного пластика в виде гранул в размере 20 руб./кг выручка энергокомпании от переработки 9 970 тонн может составить 199,4 млн руб. в год.

Таким образом, реализация технологических решений, направленных на эффективную термическую переработку отсортированных коммунальных и производственных отходов с использованием инфраструктуры ТЭЦ, может стать эффективным инвестиционным проектом для энергокомпаний.

В седьмой главе представлены результаты технико-экономического обоснования предложенных технических и технологических решений, направленных на повышение эффективности теплофикационных систем.

Для оценки энергетической эффективности предложена усовершенствованная методика расчета технико-экономических показателей ТЭЦ при изменении тепловых схем и режимов работы оборудования, совмещающая в себе метод удельной выработки электроэнергии на тепловом потреблении (УВЭТП), нормативную методику расчета показателей тепловой экономичности энергетического оборудования электростанций, а также методику оценки выбросов CO₂.

Основным показателем тепловой экономичности ТЭЦ, по которому осуществляется отбор электростанций для поставок электроэнергии на ОРЭМ, является удельный расход условного топлива (УРУТ) на отпуск электрической и тепловой энергии. В настоящее время на отечественных ТЭЦ расчет УРУТ производится в соответствии РД 34.08.552-95 (так называемый «пропорциональный» метод), одновременно на многих электростанциях продолжают выполнять расчеты в соответствии с РД 34.08.552-93 по «физическому» методу.

Особенностью предложенной усовершенствованной методики расчета технико-экономических показателей ТЭЦ является то, что при изменении типовых схем или режима работы оборудования учитывается варьирование величины удельной выработки электроэнергии на тепловом потреблении, которое затем учитывается при решении уравнений материального и теплового балансов в соответствии с РД 34.08.552-93 и РД 34.08.552-95. Изменение режимов работы оборудования учитывается введением поправок по типовым энергетическим характеристикам. По результатам расчета общего расхода топлива также рассчитывается изменение валового выброса CO₂ в соответствии с применяемой в теплоэнергетике методикой РД 153-34.0-02.318-2001 (Методические указания по расчету валового выброса двуокси углерода в атмосферу из котлов тепловых электростанций и котельных).

Основным преимуществом усовершенствованной методики расчета ТЭП ТЭЦ является существенное уменьшение необходимых для выполнения расчета исходных данных и отказ от большого количества допущений, применение которых неизбежно увеличивает погрешность вычислений. Для расчета удельной выработки электроэнергии на тепловом потреблении достаточно знать только изменения энтальпий теплоносителей.

Таким образом, усовершенствованная методика расчета ТЭП ТЭЦ позволяет отказаться от большого количества вычислений с полным расчетом тепловых схем ТЭС на всех режимах работы турбоагрегатов. При этом расхождения в результатах расчета величины теплофикационной выработки электроэнергии не превышают 3 - 4 %.

Полный расчет тепловой схемы энергоблока с турбиной Т-110/120-130 в ПК ThermoFlow выполнен для теплофикационного режима с нагрузкой 153,6 Гкал/ч для четырех вариантов с замещением пара производственного отбора на пар из нерегулируемого пятого отбора. Были рассчитаны параметры работы турбоагрегата при следующих значениях расходов пара: 10 т/ч, 20 т/ч, 30 т/ч, 40 т/ч, 50 т/ч.

Также для аналогичных расходов пара из пятого нерегулируемого отбора была рассчитана величина удельной выработки электроэнергии на тепловом потреблении методом УВЭТП. Результаты проведенного расчета величины отпуска электроэнергии на тепловом потреблении двумя методами представлены в таблице 7.

Таблица 7 - Результаты расчета величины отпуска электроэнергии на тепловом потреблении

| Наименование | Размерность | Значение | | | | |
|--|-------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 |
| Расход пара пятого отбора | т/ч | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 |
| Расход пара производственного отбора (ПО) | т/ч | 8,8 | 17,6 | 26,4 | 35,2 | 43,9 |
| Выработка электроэнергии (ThermoFlow): | | | | | | |
| при использовании пара пятого отбора | кВт | 100165 | 101880 | 103580 | 105467 | 107449 |
| при использовании пара ПО | кВт | 99088 | 99684 | 100344 | 100982 | 101771 |
| Изменение выработки электроэнергии | кВт | 1076,8 | 1854,7 | 2196,8 | 3235,7 | 4484,5 |
| Отпуск электроэнергии (ThermoFlow): | | | | | | |
| при использовании пара пятого отбора | кВт | 92959 | 94567 | 96160 | 97938 | 99810 |
| при использовании пара ПО | кВт | 91895 | 92396 | 92963 | 93506 | 94199 |
| Изменение отпуска электроэнергии | кВт | 1064,0 | 2170,8 | 3197,4 | 4431,9 | 5611,5 |
| Увеличение отпуска электроэнергии (УВЭТП): | | | | | | |
| при использовании пара пятого отбора | кВт | 2387,4 | 4808,1 | 7162,1 | 9682,9 | 12162,0 |
| при использовании пара ПО | кВт | 1355,5 | 2711,0 | 4066,5 | 5422,0 | 6777,5 |
| Изменение отпуска электроэнергии | кВт | 1031,9 | 2097,1 | 3095,6 | 4260,8 | 5384,5 |
| Отклонение в результатах расчета методом УВЭТП | % | 3,0 | 3,4 | 3,2 | 3,9 | 4,0 |

Ниже представлены расчетные зависимости для оценки энергетической эффективности разработанных технических и технологических решений.

Применительно к предложенным технологиям использования низкопотенциальных регенеративных отборов пара турбин ТЭЦ для покрытия нагрузок ВПУ удельная выработка электроэнергии на тепловом потреблении рассчитывается по формулам (4) - (6), соответственно, для тепловых схем, представленных на рисунках 1, 2 а и 2 б.

$$v_{\text{тф}}^{50\text{тб}} = \frac{0,278(h_{\text{д.в}} - h_{\text{х.о.в}})(h_{\text{г.а}} - h_{\text{сет}})}{(h_{\text{г.а}} - h_{\text{д.в}})(h_{50\text{тб}} - h_{\text{ПГА}}^{\text{д}})\eta_{\text{ПГА}}} \left[(h_0 - h_{50\text{тб}})\eta_{\text{эм}} + \frac{(h_{\text{п.в}} - h_{\text{ПГА}}^{\text{д}})(h_0 - h_{\text{рег}}^{\text{э}})\eta_{\text{эм}}}{(h_{\text{рег}}^{\text{э}} - h_{\text{п.в}})} - \frac{\Delta P}{\eta_{\text{н}\rho}} \right], \quad (4)$$

где $h_{\text{д.в}}$ - энтальпия деаэрированной воды после вакуумного деаэратора, кДж/кг; $h_{\text{х.о.в}}$ - энтальпия воды после химического умягчения, кДж/кг; $h_{\text{г.а}}$ - энтальпия греющего агента, подаваемого в вакуумный деаэратор, кДж/кг; $h_{\text{сет}}$ - энтальпия сетевой воды, подогреваемой в подогревателе греющего агента, кДж/кг; $h_{50\text{тб}}$ - энтальпия пара пятого нерегулируемого отбора, кДж/кг; $h_{\text{ПГА}}^{\text{д}}$ - энтальпия конденсата греющего пара после подогревателя греющего агента, кДж/кг; $\eta_{\text{ПГА}}$ - КПД подогревателя греющего агента; h_0 - энтальпия свежего пара перед турбиной, кДж/кг; $h_{\text{п.в}}$ - энтальпия питательной воды, кДж/кг; $\eta_{\text{эм}}$ - электромеханический КПД турбоагрегата; $h_{\text{рег}}^{\text{э}}$ - энтальпия условного эквивалентного регенеративного отбора, кДж/кг; $\frac{\Delta P}{\eta_{\text{н}\rho}}$ - увеличение затрат электроэнергии на привод насосного оборудования, кДж/кг.

$$v_{\text{тф}}^{50\text{тб}} = \frac{0,278(h_{\text{д.в}}^{\text{I}} - h_{\text{д.в}})}{(h_{50\text{тб}} - h_{\text{ПДВ}}^{\text{д}})\eta_{\text{ПДВ}}} \left[(h_0 - h_{50\text{тб}})\eta_{\text{эм}} + \frac{(h_{\text{п.в}} - h_{\text{ПДВ}}^{\text{д}})(h_0 - h_{\text{рег}}^{\text{э}})\eta_{\text{эм}}}{(h_{\text{рег}}^{\text{э}} - h_{\text{п.в}})} \right], \quad (5)$$

где $h_{\text{д.в}}$ и $h_{\text{д.в}}^{\text{I}}$ - соответственно энтальпия добавочной питательной воды до и после подогрева в пароводяном подогревателе добавочной воды (ПДВ), кДж/кг; $h_{\text{ПДВ}}^{\text{д}}$ - энтальпия дренажа греющего пара после подогревателя добавочной воды, кДж/кг; $\eta_{\text{ПДВ}}$ - КПД подогревателя добавочной воды.

$$v_{\text{тф}}^{50\text{тб}} = \frac{0,278(h_{\text{о.в}}^{\text{I}} - h_{\text{о.в}})}{(h_{50\text{тб}} - h_{\text{ПОВ}}^{\text{д}})\eta_{\text{ПОВ}}} \left[(h_0 - h_{50\text{тб}})\eta_{\text{эм}} + \frac{(h_{\text{п.в}} - h_{\text{ПОВ}}^{\text{д}})(h_0 - h_{\text{рег}}^{\text{э}})\eta_{\text{эм}}}{(h_{\text{рег}}^{\text{э}} - h_{\text{п.в}})} - \frac{\Delta P}{\eta_{\text{н}\rho}} \right], \quad (6)$$

где $h_{\text{о.в}}$ и $h_{\text{о.в}}^{\text{I}}$ - соответственно энтальпия обессоленной воды до и после подогрева в пароводяном подогревателе обессоленной воды (ПОВ), кДж/кг; $h_{\text{ПОВ}}^{\text{д}}$ - энтальпия дренажа греющего пара после подогревателя обессоленной воды, кДж/кг; $\eta_{\text{ПОВ}}$ - КПД подогревателя обессоленной воды.

Применение на ТЭЦ решения, показанного на рисунке 1, позволяет ежегодно экономить более 3000 тонн условного топлива в расчете на ВПУ производительностью 2000 м³/ч.

Для водоподготовительной установки ТЭЦ производительностью 400 м³/ч, восполняющей потери пара и конденсата из цикла станции, реализация решения, представленного на рисунке 2 а, позволяет экономить более 7900 т у.т. в год.

Применительно к реализованному на Ульяновской ТЭЦ-1 технологическому решению экономический эффект от использования пятого нерегулируемого отбора турбины Т-100/120-130-3 ст. №8 составляет более 1800 т у.т.

Энергетическая эффективность усовершенствованного режима работы баков-аккумуляторов подпиточной воды теплосети определяется увеличением суммарной мощности, вырабатываемой турбоустановкой на тепловом потреблении при нагреве исходной подпиточной воды теплосети обработавшим паром. Суммарная дополнительная мощность $\sum N_{\text{тф}}$, кВт, составляет

$$\sum N_{\text{ТФ}} = \left(\frac{G'_{\text{исх}} \Delta h'_{\text{исх}} \eta_{\text{ЭМ}}}{\Delta h_{\text{п}}} \left((h_o - h_k) + \frac{\Delta h_{\text{ок}} (h_o - h_{\text{рег}}^{\text{э}})}{\Delta h_{\text{рег}}} \right) \right) - \left(G_{\text{исх}} \eta_{\text{ЭМ}} \left(\frac{\Delta h_{\text{исх}}^{\text{к}} (h_o - h_k)}{\Delta h_{\text{п}}} + \frac{\Delta h_{\text{исх}}^{\text{к}} \Delta h_{\text{ок}} (h_o - h_{\text{рег}}^{\text{э}})}{\Delta h_{\text{п}} \Delta h_{\text{рег}}} + \frac{\Delta h_{\text{исх}}^{\text{ПИБ}} (h_o - h_{\text{ПИБ}})}{\Delta h_{\text{ПИБ}}} \right) \right), \quad (7)$$

где $G_{\text{исх}}$ и $G'_{\text{исх}}$ – расход исходной воды, подогреваемой в конденсаторе до и после изменения режима, кг/с; $\Delta h_{\text{исх}}^{\text{к}}$ и $\Delta h'_{\text{исх}}^{\text{к}}$ – изменение энтальпии исходной воды в конденсаторе до и после изменения режима, кДж/кг; h_k – энтальпия отработавшего пара турбины, кДж/кг; $\Delta h_{\text{п}}$ – изменение энтальпии пара в конденсаторе, кДж/кг; $\Delta h_{\text{ок}}$ – изменение энтальпии основного конденсата, кДж/кг; $h_{\text{рег}}^{\text{э}}$ – энтальпия условного эквивалентного регенеративного отбора, кДж/кг; $\Delta h_{\text{рег}}$ – изменение энтальпии пара условного эквивалентного отбора, кДж/кг; $\Delta h_{\text{исх}}^{\text{ПИБ}}$ – изменение энтальпии исходной воды в ПИВ, кДж/кг; $h_{\text{ПИБ}}$ – энтальпия пара, поступающего в ПИВ, кДж/кг; $\Delta h_{\text{ПИБ}}$ – изменение энтальпии пара в ПИВ, кДж/кг.

При работе УЛТЭЦ-1 в режиме заполнения баков-аккумуляторов (БА) в часы максимального электропотребления в течение 12 часов дополнительная мощность, вырабатываемая турбоагрегатом с турбиной Т-100/120-130 на тепловом потреблении, составляет 8,1 МВт. Проведенные для реальных условий работы ТЭЦ ВАЗа расчеты показывают, что при имеющейся полезной емкости БА и увеличении расхода исходной подпиточной воды, электростанция может работать в режиме заполнения более 10 часов. При этом дополнительная мощность, вырабатываемая на тепловом потреблении, превышает 19 МВт.

При реализации на ТЭЦ предложенной технологии применения отработавшего пара турбин ТЭЦ в схемах подготовки воды для целей централизованного холодного водоснабжения основной эффект достигается за счет увеличения мощности, развиваемой турбоагрегатом на тепловом потреблении из-за дополнительного пропуска пара во встроенный пучок конденсатора выделенной турбины. Величина дополнительной теплофикационной мощности определяется по формуле

$$\begin{aligned} \sum N = & G_{\text{хв}} \cdot \Delta h_{\text{хв}} \cdot \left(\frac{(h_o - h_k) \cdot (h_{\text{рег}}^{\text{э}} - h_d) + (h_d - h'_k) \cdot (h_o - h_{\text{рег}}^{\text{э}}) \cdot \eta_{\text{ЭМ}}}{(h_k - h'_k) \cdot (h_{\text{рег}}^{\text{э}} - h_d)} - \frac{\Delta P}{\Delta h_{\text{хв}} \eta_{\text{нр}}} \right) - \\ & - G_{\text{св}} \cdot \Delta h_{\text{св}} \cdot \left(\frac{(h_o - h_{\text{ср}}) \cdot (h_{\text{рег}}^{\text{э}} - h_d) + (h_d - h'_{\text{ср}}) \cdot (h_o - h_{\text{рег}}^{\text{э}}) \cdot \eta_{\text{ЭМ}}}{(h_{\text{ср}} - h'_{\text{ср}}) \cdot (h_{\text{рег}}^{\text{э}} - h_d)} - \frac{\Delta P}{\Delta h_{\text{св}} \eta_{\text{нр}}} \right) - \\ & - G_{\text{подп}} \cdot \Delta h_{\text{подп}} \cdot \frac{(h_o - h_{\text{пхов}}) - (h_k - h'_k) \cdot (h_o - h_{\text{пхов}}) + (h_o - h_k) (h_{\text{пхов}} - h'_{\text{пхов}}) \cdot \eta_{\text{ЭМ}}}{(h_{\text{пхов}} - h'_{\text{пхов}}) \cdot (h_k - h'_k)}, \quad (8) \end{aligned}$$

где $G_{\text{хв}}$ – расход питьевой воды системы централизованного холодного водоснабжения, кг/с; $\Delta h_{\text{хв}}$ – изменение энтальпии подогреваемой воды на входе и выходе из конденсатора, кДж/кг; h_o – энтальпия питательной воды после деаэратора, кДж/кг; h'_k – энтальпия конденсата отработавшего пара, кДж/кг; $G_{\text{св}}$ – расход сетевой воды, кг/с; $\Delta h_{\text{св}}$ – изменение энтальпии сетевой воды, кДж/кг; $h_{\text{ср}}$ – средневзвешенная энтальпия отопительных отборов, кДж/кг; $h'_{\text{ср}}$ – средневзвешенная энтальпия конденсата сетевых подогревателей, кДж/кг; $G_{\text{подп}}$ – расход подпиточной воды теплосети, кг/с; $\Delta h_{\text{подп}}$ – изменение энтальпии подпиточной воды теплосети, кДж/кг; $h_{\text{пхов}}$ – энтальпия греющего пара

в подогревателе химически очищенной воды, кДж/кг; $h'_{пхов}$ – энтальпия конденсата пара в подогревателе химически очищенной воды, кДж/кг.

Одним из основных показателей, по которому оценивается энергетическая эффективность технологий утилизации снега на ТЭЦ, является величина удельной выработки электроэнергии на тепловом потреблении, кВт·ч/т, получаемая за счет увеличения количества отбираемого пара на утилизацию 1 тонны снега. Величина удельной выработки электроэнергии на тепловом потреблении $v_{тф}$, кВт·ч/т, получаемой за счет увеличения отборов пара на утилизацию 1 тонны снега для тепловой схемы, показанной на рисунке 9, составит

$$v_{тф} = \sum N/G_{ссу} = \left(\frac{G_{ссу} \Delta h_{снег}}{3,6 \eta_{ссу}} \left(\frac{(h_o - h_{ср}) \eta_{эм}}{(h_{ср} - h'_{ср})} + \frac{(h_d - h'_{ср})(h_o - h_{пер}^3) \eta_{эм}}{(h_{ср} - h'_{ср})(h_{пер}^3 - h_d)} - \frac{\Delta P}{\Delta h_{осв} \eta_{н\rho}} \right) / G_{ссу} = \right. \\ \left. \frac{\Delta h_{снег}}{3,6 \eta_{ссу}} \left(\frac{(h_o - h_{ср}) \eta_{эм}}{(h_{ср} - h'_{ср})} + \frac{(h_d - h'_{ср})(h_o - h_{пер}^3) \eta_{эм}}{(h_{ср} - h'_{ср})(h_{пер}^3 - h_d)} - \frac{\Delta P}{\Delta h_{осв} \eta_{н\rho}} \right) \right) \quad (9)$$

Результаты проведенного сравнительный анализ тепловой экономичности предложенных технических и технологических решений представлены в таблице 8.

Расчет валового выброса CO_2 за отчетный период M_{CO_2} при сжигании твердого (кроме сланцев) и жидкого топлива производится по формуле

$$M_{CO_2} = 0,01 B_{нат} 3,664 C_p (1 - 0,01 q_4), \quad (10)$$

где $B_{нат}$ - расход натурального твердого или жидкого топлива за отчетный период, т; C_p - содержание углерода в топливе на рабочую массу, %; q_4 - потери теплоты от механической неполноты сгорания твердого и жидкого топлива, %.

При наличии данных о химическом составе газообразного топлива расчет валового выброса CO_2 за отчетный период производится по формуле

$$M_{CO_2} = B_{нат} \rho_{CO_2} V_{RO_2}, \quad (11)$$

где $B_{нат}$ - расход натурального газообразного топлива за отчетный период, тыс. м³; ρ_{CO_2} - плотность диоксида углерода, кг/м³, принимаемая равной 1,9768 кг/м³; V_{RO_2} - объем трехатомных газов в продуктах сгорания газообразного топлива, м³/м³:

$$V_{RO_2} = 0,01 [CO_2 + CO + \sum (m C_m H_n)], \quad (12)$$

где CO_2 , CO , $C_m H_n$ - химический состав газообразного (% по объему) топлива по данным анализа.

В диссертационном исследовании для расчета валового выброса CO_2 принимался химический состав газообразного топлива Уренгойского месторождения.

Результаты расчета экономии условного топлива и снижения выбросов CO_2 для предложенных технологий представлены в таблице 8.

Для автоматизации расчетов удельных расходов условного топлива на отпуск электрической и тепловой энергии усовершенствованная методика расчета ТЭП ТЭЦ реализована в виде программных комплексов для ЭВМ:

1. Расчет показателей тепловой экономичности ТЭЦ в соответствии с РД 34.08.552-93 («физический» метод).

2. Расчет показателей тепловой экономичности ТЭЦ в соответствии с РД 34.08.552-95 («пропорциональный» метод).

Таблица 8 - Годовая экономия условного топлива и снижение выбросов CO₂

| № | Наименование технологии | Годовая экономия условного топлива, т | Снижение выбросов CO ₂ , т |
|---|--|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 1 | Применение пятого отбора пара турбин типа Т для оптимизации тепловых схем ВПУ подготовки подпиточной воды теплосети с расходом 2000 м ³ /ч (рисунок 1) | 3067 | 4953 |
| 2 | Применение пятого отбора пара турбин типа Т для оптимизации тепловых схем вакуумной деаэрации добавочной питательной воды с расходом 400 м ³ /ч (рисунок 2 а) | 7900 | 12760 |
| 3 | Применение пятого отбора пара турбин типа Т для оптимизации тепловых схем атмосферной деаэрации добавочной питательной воды с расходом 400 м ³ /ч (рисунок 2 б) | 4450 | 7187 |
| 4 | Усовершенствованный режим работы баков-аккумуляторов подпиточной воды теплосети УлТЭЦ-1 | 9351 | 15102 |
| 5 | Применение отработавшего пара выделенной турбины УлТЭЦ-1 в схеме подогрева питьевой воды | 5184 | 8372 |
| 6 | Применение обратной сетевой воды в качестве греющей среды в стационарной снегоплавильной установке, размещаемой на УлТЭЦ-1 | 14 653 | 23 666 |

Проведенные с использованием разработанных программных комплексов расчеты (см. таблицу 9) показали, что внедрение на УлТЭЦ-1 новой технологии с применением для утилизации снега обратной сетевой воды позволяет улучшить удельные расходы условного топлива на отпуск электроэнергии более чем 15 г/кВт·ч, а на отпуск теплоты - на 0,21 кг/Гкал.

Таблица 9 - Результаты расчета УРУТ, проведенных с использованием программных комплексов

| Параметр | До внедрения проекта | | После внедрения проекта | |
|---|----------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|
| | «физический» метод | «пропорциональный» метод | «физический» метод | «пропорциональный» метод |
| Удельный расход топлива на отпуск тепловой энергии, кг/Гкал | 178,55 | 144,11 | 178,34 | 143,90 |
| Удельный расходы топлива на отпуск электроэнергии, г/кВт·ч | 217,98 | 292,34 | 202,58 | 276,94 |

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлено, что в настоящее время энергетическая эффективность теплофикационных систем существенно снизилась, что обусловлено: существенным сокращением выработки электроэнергии на тепловом потреблении; значительными потерями при транспорте теплоносителя; условиями оптового рынка электроэнергии и мощности, не позволяющего обеспечивать стабильную загрузку турбоагрегатов ТЭЦ по тепловому графику. В сложившихся условиях сохранение и развитие теплофикации является актуальной задачей, решение которой возможно за счет комплексного подхода к повышению эффективности когенерционных систем путем расширения функционала городских ТЭЦ.

2. Разработан комплексный подход к повышению эффективности теплофикационных систем за счет совместного развития предприятий энергетики и ЖКХ региона, в

рамках которого предложены и научно обоснованы технические и технологические решения по совершенствованию тепловых схем и режимов работы ТЭЦ, расширению функционала теплоэлектроцентралей в составе единого энергетического комплекса городского хозяйства. Взаимовыгодное сотрудничество муниципальных образований с энергетическими компаниями при оказании услуг для нужд коммунального хозяйства, в том числе для термической переработки отсортированных коммунальных и производственных отходов, а также утилизации вывозимого с городских улиц снега, возможно при условии, что цена такой услуги будет ниже рыночной. При определении рыночной стоимости услуги может быть положен принцип, учитывающий реализацию проекта по наилучшим доступным технологиям с установлением тарифа, обеспечивающего возврат инвестиций в разумные сроки.

3. С целью совершенствования тепловых схем ВПУ ТЭЦ, не отвечающих современным требованиям энергетической эффективности, разработан комплекс научно обоснованных технических и технологических решений, позволяющих повысить эффективность внутренней теплофикации за счет применения низкопотенциальных регенеративных отборов пара теплофикационных турбин.

4. По результатам проведенного на действующей ТЭЦ расчетно-экспериментального исследования определены режимные характеристики работы турбоустановок с турбинами типа Т-100/120-130, обеспечивающие необходимый для реализации разработанных технических решений регулировочный диапазон изменения давления пара в камере пятого нерегулируемого отбора. На основании полученных уравнений регрессии, описывающих зависимость параметров пара в 5-ом отборе от расхода свежего пара и давления в теплофикационном отборе, установлено, что для наиболее часто встречающихся в эксплуатации режимов работы по электрическому графику расход свежего пара на турбину должен превышать 200 т/ч, а электрическая мощность – 50 МВт.

5. Предложен и обоснован усовершенствованный режим работы ВПУ ТЭЦ, позволяющий увеличить теплофикационную выработку электроэнергии за счет изменения режима работы баков-аккумуляторов подпиточной воды теплосети в открытых системах теплоснабжения. Проведенное исследование режимов работы ВПУ на примере Ульяновской ТЭЦ-1 подтверждает возможность тиражирования новой технологии энергоэффективного использования баков-аккумуляторов подпиточной воды теплосети в открытых системах теплоснабжения. Установлено, что при работе УлТЭЦ-1 в режиме заполнения баков в часы максимального электропотребления в течение 12 часов дополнительная мощность, вырабатываемая на тепловом потреблении, превышает 8 МВт. Для реальных условий работы ТЭЦ ВАЗа дополнительная теплофикационная мощность превысит 19 МВт.

6. С целью снижения затрат электроэнергии на транспорт теплоносителя в теплофикационных системах предложено и обосновано техническое решение, позволяющее снизить до 20 % потребление электроэнергии на насосно-дресселирующих станциях тепловых сетей за счет использования дополнительного источника энергии - мини-ГЭС. Для оценки потенциала энергосбережения при внедрении мини-ГЭС на насосно-дресселирующих станциях в теплофикационных системах России рассчитаны зависимости, позволяющие определить электрическую мощность мини-ГЭС в зависимости от перепада давлений на регуляторе подпора НДС и расхода сетевой воды по обратному трубопроводу.

7. Предложены и обоснованы новые и усовершенствованы существующие технические и технологические решения, обеспечивающие повышение эффективности теплофикационных систем за счет расширения функционала городских ТЭЦ по следующим

направлениям: применение низкопотенциальных источников теплоты ТЭЦ в качестве греющей среды в стационарных снегоплавильных установках; применение отработавшего пара турбин ТЭЦ в схемах подготовки воды для целей централизованного холодного водоснабжения (ХВС); использование инфраструктуры ТЭЦ для термической переработки коммунальных и производственных отходов.

Проведенное обоснование разработанных технологий утилизации вывозимого с городских улиц снега на ТЭЦ показало, что из предложенных решений использования низкопотенциальных источников теплоты для внедрения рекомендуется технология с применением обратной сетевой воды, отбираемой в теплообменник снегоплавильной установки из общего коллектора на вводе ТЭЦ.

Применение отработавшего пара турбин ТЭЦ в схемах подготовки воды для целей централизованного ХВС обосновано для двух вариантов: 1) при проектировании и новом строительстве водоочистных сооружений водоканала за счет подогрева (до 30 °С) исходной воды перед водоочисткой в конденсаторе турбины мини-ТЭЦ; 2) на действующих ТЭЦ путем организации регулируемого (до 20 °С) подогрева питьевой воды системы централизованного холодного водоснабжения во встроенном пучке конденсатора выделенной паровой турбины.

Для термической переработки пластика на ТЭЦ предложена новая запатентованная технология, предусматривающая использование отборного пара турбин в экструзионных установках. В сравнении с электрическим нагревом экономия от применения отборного пара турбин для плавления пластика в экструзионной установке составляет 542 руб./т и 580 руб./т, соответственно, при использовании пара производственного и отопительного отбора. На примере г. Ульяновска рассчитан экономический эффект от реализации вторичного переработанного пластика в виде гранул. С учетом разности в стоимости между отходами пластмасс и вторичного переработанного пластика в виде гранул в размере 20 руб./кг выручка энергокомпании от переработки 9 970 тонн может составить 199,4 млн руб. в год.

8. Предложена усовершенствованная методика расчета технико-экономических показателей ТЭЦ (ТЭП ТЭЦ) при изменении тепловых схем и режимов работы оборудования, совмещающая в себе несколько методов: метод удельной выработки электроэнергии на тепловом потреблении (УВЭТП), нормативную методику расчета показателей тепловой экономичности энергетического оборудования электростанций (в соответствии с РД 34.08.552-93 и РД 34.08.552-95), а также методику оценки выбросов CO₂. Основным преимуществом разработанной оригинальной методики расчета ТЭП ТЭЦ является существенное уменьшение необходимых для выполнения расчета исходных данных и отказ от большого количества допущений, применение которых неизбежно увеличивает погрешность вычислений. Для расчета удельной выработки электроэнергии на тепловом потреблении достаточно знать только изменения энтальпий теплоносителей. Изменение режимов работы оборудования учитывается введением поправок по типовым энергетическим характеристикам. Для автоматизации расчетов удельных расходов условного топлива на отпуск электрической и тепловой энергии усовершенствованная методика реализована в виде программных комплексов для ЭВМ.

9. Выполнена оценка технико-экономических показателей новых технических и технологических решений, направленных на повышение эффективности теплофикационных систем.

Установлено, что для водоподготовительной установки ТЭЦ производительностью 400 м³/ч, восполняющей потери пара и конденсата из цикла станции, реализация разработанного технологического решения вакуумной деаэрации с использованием пара пятого нерегулируемого отбора позволяет экономить более 7900 т у.т. в год (снижение выбросов CO₂ составляет 12759 т).

Проведенный для Ульяновской ТЭЦ-1 расчет тепловой экономичности показал, что годовая экономия условного топлива при реализации усовершенствованного режима использования баков-аккумуляторов превышает 9300 тонн (снижение выбросов CO₂ составляет 15020 т).

В результате расчета энергетической эффективности технологии применения городских ТЭЦ в схеме подготовки питьевой воды системы централизованного холодного водоснабжения на примере г. Ульяновска выявлено, что увеличение мощности, развиваемой турбоагрегатом на тепловом потреблении, превышает 3,3 МВт в расчете на энергоблок с турбиной типа Т-100-130, а годовая экономия условного топлива составляет 5184 т (снижение выбросов CO₂ составляет 8372 т).

С учетом фактических условий реализации предложенной технологии использования обратной сетевой воды для утилизации снега, вывозимого с городских улиц Ульяновска, экономия топлива на ТЭЦ составляет 14 653 т у.т. (снижение выбросов CO₂ – 23 666 т) при работе СУ производительностью 650 т/ч в течение 90 дней. Также для г. Ульяновска обоснована взаимовыгодная для муниципального образования и энергокомпании стоимость утилизации снега, которая составила 25 руб. за 1 м³ (в ценах 2023 г.). При утилизации на УлТЭЦ-1 около 4,0 млн м³ снега выручка энергокомпании за сезон может составить около 100 млн руб.

Рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы исследования диссертационной работы. Перспективным направлением совместного развития предприятий энергетики и ЖКХ является расширение функционала ТЭЦ за счет обработки осадков сточных вод, образующихся на городских канализационных очистных сооружениях.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Монографии

1. Шарапов, В.И. Повышение эффективности систем регенерации турбин ТЭЦ / В.И. Шарапов, М.М. Замалеев. – Ульяновск: УлГТУ, 2009. – 289 с.

2. Замалеев, М.М. Использование энергетического потенциала ТЭЦ в городском хозяйстве / М.М. Замалеев, И.В. Губин, В.И. Шарапов. - Ульяновск: УлГТУ, 2019. – 178 с.

Научные статьи, опубликованные в изданиях по списку ВАК

3. Замалеев, М.М. Резервы повышения эффективности использования регенеративных отборов турбин ТЭЦ / М.М. Замалеев, В.И. Шарапов // Теплоэнергетика. - 2008. - № 4. - С. 64-67.

4. Замалеев, М.М. О способах повышения эффективности теплофикации на ТЭЦ / М.М. Замалеев, В.И. Шарапов // Энергобезопасность и энергосбережение. - 2010. - № 2. - С. 9-11.

5. Замалеев, М.М. Оптимизация тепловых схем водоподготовительных установок ТЭЦ / М.М. Замалеев, В.И. Шарапов, А.А. Салихов // Труды Академэнерго. - 2010. - № 3. - С. 45-64.

6. **Замалеев, М.М.** Возможности использования нерегулируемых отборов пара теплофикационных турбин в схемах водоподготовительных установок / М.М. Замалеев, В.И. Шарапов // Энергетик. - 2012. - № 5. - С. 18-20.

7. **Замалеев, М.М.** Организация полезного использования «сбросной» теплоты на ТЭЦ / М.М. Замалеев, В.И. Шарапов, А.А. Салихов, И.В. Япаров // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. - 2013. - № 11-12. - С. 45-54.

8. **Замалеев, М.М.** Утилизация бросового потенциала вторичных энергоресурсов на ТЭС и в тепловых сетях / М.М. Замалеев, В.И. Шарапов, А.А. Салихов, И.В. Япаров // Энергобезопасность и энергосбережение. - 2014. - № 2. - С. 14-17.

9. Шарапов, В.И. Пути предотвращения сульфидного загрязнения тепловых сетей / В.И. Шарапов, **М.М. Замалеев** // Энергосбережение и водоподготовка. - 2014. - № 5. - С. 13-17.

10. **Замалеев, М.М.** Энергоэффективные технологии утилизации снега в городах / М.М. Замалеев, В.И. Шарапов, А.А. Салихов, И.В. Япаров // Энергосбережение и водоподготовка. - 2014. - № 1. - С. 14-17.

11. Шарапов, В.И. Проблемы оптимизации работы городских теплофикационных систем / В.И. Шарапов, **М.М. Замалеев**, П.Е. Чаукин // Надежность и безопасность энергетики. - 2015. - № 1. - С. 76-79.

12. Шарапов, В.И. Способы контроля герметичности вакуумных систем турбин и вакуумных деаэраторов / В.И. Шарапов, **М.М. Замалеев**, Е.В. Кудрявцева // Электрические станции. - 2015. - № 5. - С. 24-27.

13. Шарапов, В.И. Решение проблем бактериологического загрязнения систем теплоснабжения / В.И. Шарапов, **М.М. Замалеев** // Теплоэнергетика. - 2015. - № 9. - С. 77.

14. Шарапов, В.И. Способы обнаружения мест разгерметизации теплоэнергетического оборудования, работающего под вакуумом / В.И. Шарапов, **М.М. Замалеев**, Е.В. Кудрявцева // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. - 2015. - № 3-4. - С. 3-10.

15. **Замалеев, М.М.** Использование энергетического потенциала ТЭЦ для нужд коммунального хозяйства / М.М. Замалеев, В.И. Шарапов, И.В. Губин, В.А. Павлов // Труды Академэнерго. - 2016. - № 2. - С. 46-57.

16. **Замалеев, М.М.** Применение ТЭЦ в схеме подготовки питьевой воды системы централизованного холодного водоснабжения / М.М. Замалеев, В.И. Шарапов, И.В. Губин, В.А. Павлов, А.Н. Чернов // Энергосбережение и водоподготовка. - 2016. - № 5. - С. 46-50.

17. **Замалеев, М.М.** Техничко-экономическое обоснование новых технологий утилизации снега на ТЭЦ / М.М. Замалеев, В.И. Шарапов, И.В. Губин и др. // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. - 2016. - № 11-12. - С. 3-9.

18. Шарапов, В.И. Технологии предотвращения и устранения последствий бактериологического загрязнения теплосети / В.И. Шарапов, **М.М. Замалеев**, Е.А. Астафьева, Н.Ю. Колбасова // Труды Академэнерго. - 2017. - № 1. - С. 60-70.

19. Шарапов, В.И. Модернизация теплофикационных систем городов: цели и практика / В.И. Шарапов, М.Е. Орлов, **М.М. Замалеев**, П.Е. Чаукин // Надежность и безопасность энергетики. - 2018. - № 3. - С. 184-191.

20. Орлов, М.Е. О целесообразности и возможности подогрева воды для систем теплоснабжения за счет использования теплоты основного конденсата теплофикационных турбин / М.Е. Орлов, **М.М. Замалеев**, А.В. Кузьмин, В.И. Шарапов // Надежность и безопасность энергетики. - 2018. - № 2. - С. 117-125.

21. **Замалеев, М.М.** Новый режим использования баков-аккумуляторов подпиточной воды теплосети для повышения тепловой экономичности ТЭЦ / М.М. Замалеев, И.В. Губин, В.И. Шарапов // Энергосбережение и водоподготовка. - 2018. - № 2. - С. 31-35.

22. Шарапов, В.И. Корректировка способов регулирования отпуска теплоты в существующих городских теплофикационных системах / В.И. Шарапов, М.Е. Орлов, **М.М. Замалеев**, П.В. Ротов, П.Е. Чаукин // Промышленная энергетика. – 2018. – № 11. – С. 19-25.

23. Орлов, М.Е. Варианты организации энергоэффективного подогрева добавочной питательной воды котлов ТЭЦ / М.Е. Орлов, В.И. Шарапов, А.В. Кузьмин, **М.М. Замалеев** // Энергосбережение и водоподготовка. – 2019. – № 1. – С. 20-26.

24. **Замалеев, М.М.** Возможности регенерации бросовой теплоты турбогенераторов ТЭЦ в схеме подготовки подпиточной воды теплосети / М.М. Замалеев, В.И. Шарапов, И.А. Марков, К.С. Нарышкина, И.В. Губин // Энергосбережение и водоподготовка. – 2020. – № 1. – С. 21-23.

25. **Замалеев, М.М.** Возможности термической переработки пластика на ТЭЦ / М.М. Замалеев, А.В. Абрамов, А.А. Яковлев, А.В. Замалеева, М.А. Малешина // Энергосбережение и водоподготовка. - 2021. - № 3. - С. 23-26.

26. **Замалеев, М.М.** Расширение функционала ТЭЦ за счет разработки технических решений, направленных на эффективную термическую переработку коммунальных отходов / М.М. Замалеев, А.В. Абрамов // Энергетик. – 2023. – № 2. – С. 24-26.

Публикации в изданиях, включенных в базы Scopus и WoS

27. **Zamaleev, M.M.** Means of improving the economy of water-preparation units at TPP / М.М. Zamaleev, V.A. Dolgalev, V.I. Sharapov // Power Technology and Engineering. Vol. 41. № 5. - 2007. - P. 302-305.

28. **Zamaleev, M.M.** Reserves for improving the utilization efficiency of regenerative extractions from turbines at cogeneration stations // М.М. Zamaleev, V.I. Sharapov // Thermal Engineering. Vol. 55. № 4. - 2008. - P. 343-346.

29. Sharapov, V.I. Solution to problems of bacterial impurity of heating systems / V.I. Sharapov, **M.M. Zamaleev** // Thermal Engineering. Vol. 62. № 9. - 2015. - P. 687-690.

30. Sharapov, V.I. Methods for Monitoring the Vacuum Seals of Turbine Systems and Vacuum Deaerators / V.I. Sharapov, **M.M. Zamaleev**, E.V. Kudryavtseva // Power Technology and Engineering. Vol. 49. № 4. - 2015. - P. 287-290.

31. **Zamaleev, M.M.** About opportunities of the sharing of city infrastructure centralized warmly - and water supply / М.М. Zamaleev, I.V. Gubin, V.I. Sharapov // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. V.891. №. 012193.

32. Gubin, I.V. Use of infrastructure of combined heat and power plant for utilization of snow on the example of Ulyanovsk / I.V. Gubin, **M.M. Zamaleev**, V.I. Sharapov // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. V.891. №. 012190.

33. **Zamaleev, M.M.** Calculation methods of power efficiency of combined heat and power plant at change of equipment operating modes and thermal schemes / М.М. Zamaleev, I.V. Gubin, V.I. Sharapov, E.N. Bushuev // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. V.1111. №. 012039.

34. **Zamaleev, M.M.** Use of energy potential of thermal power plants in engineering infrastructure of the city / М.М. Zamaleev, I.V. Gubin, V.I. Sharapov // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. V.891. №. 012038.

35. **Zamaleev, M.M.** Expansion of TPP functionality as a way of increasing its energy efficiency / М.М. Zamaleev, I.V. Gubin, A.V. Abramov, A.A. Yakovlev // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. V.1683. №. 042063.

36. **Zamaleev, M.M.** Technology of desorption of dissolved oxygen from water by boiler exhaust gases / М.М. Zamaleev, R.I. Kamalova, O.V. Pazushkina // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. V.1683. №. 042062.

37. Kovalnogov, V.N. Mathematical substantiation of the possibility of using exhaust gases from heat-generating installations as a desorbing agent in deaerators / V.N Kovalnogov, **М.М. Замалеев**, R.I. Kamalova, R.V. Fedorov, T.E. Simos // AIP Conference Proceedings, - 2022, V.2611.№ 120004.

Публикации в других изданиях

38. **Замалеев, М.М.** О возможностях увеличения теплофикационной выработки электроэнергии на ТЭЦ / М.М. Замалеев, В.И. Шарапов // Новости теплоснабжения. – 2010. – № 5. – С. 45-47.

39. **Замалеев, М.М.** Использование вторичных энергоресурсов в теплофикационных системах / М.М. Замалеев, В.И. Шарапов // Новости теплоснабжения. – 2014. – № 8. – С. 22-25.

40. **Замалеев, М.М.** О мероприятиях по предотвращению биологического загрязнения сетевой воды / М.М. Замалеев, В.И. Шарапов // Новости теплоснабжения. – 2015. – № 4. – С. 43-47.

41. **Замалеев, М.М.** О повышении эффективности теплофикации на теплоэлектроцентралях / М.М. Замалеев, В.И. Шарапов // Энергосбережение. – 2010. – № 1. – С. 46-49.

42. **Замалеев, М.М.** Повышение эффективности ТЭЦ / М.М. Замалеев, В.И. Шарапов // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. - 2011. - № 10. - С. 58-61.

В материалах конференций

43. **Замалеев, М.М.** О возможностях совместного использования городской инфраструктуры централизованного тепло- и водоснабжения / М.М. Замалеев, И.В. Губин, В.И. Шарапов // Матер. Междунар. конф. «Современные проблемы теплофизики и энергетики». В 2-х т. Том 2 – М.: НИУ МЭИ, 2017.- С. 58.

44. Губин, И.В. О возможности использования ТЭЦ для утилизации снега на примере г. Ульяновска / И.В. Губин, **М.М. Замалеев** // Матер. 7-й Междунар. науч.-техн. конф. «Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности». В 2-х т. Том 1 – Ульяновск: УлГТУ, 2017. - С. 285-292.

45. **Замалеев, М.М.** Возможности повышения эффективности ТЭЦ за счет оптимизации режима работы баков-аккумуляторов/ М.М. Замалеев, И.В. Губин, В.И. Шарапов // Матер. Всероссийской науч. конф. с международным участием «XI Семинар ВУЗов по теплофизике и энергетике» - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019 – С.152-153.

46. **Замалеев, М.М.** Расширение функционала ТЭЦ как способ повышения ее энергетической эффективности / М.М. Замалеев, И.В. Губин, А.В. Абрамов, А.А. Яковлев // Матер. III Междунар. конф. «Современные проблемы теплофизики и энергетики». – М.: НИУ МЭИ, 2020. - С. 544- 545.

Патенты

47. Патент 2430242 (RU). Тепловая электрическая станция / В.И. Шарапов, М.Е. Орлов, **М.М. Замалеев**, А.В. Кузьмин, А.А. Салихов // Бюл. изобретений. - 2011. - № 27.

48. Патент 2449133 (RU). Тепловая электрическая станция / **М.М. Замалеев**, В.И. Шарапов, М.Е. Орлов, А.А. Салихов, А.В. Кузьмин // Бюл. изобретений. - 2012. - № 12.

49. Патент 2460888 (RU). Способ работы тепловой электрической станции / **М.М. Замалеев**, В.И. Шарапов, М.Е. Орлов, А.А. Салихов, А.В. Кузьмин // Бюл. изобретений. - 2012. - № 25.

50. Патент 165883 (RU). Тепловая электрическая станция / **М.М. Замалеев**, В.И. Шарапов, И.В. Губин, В.А. Павлов, И.В. Япаров // Бюл. изобретений. – 2016. - №31.

51. Патент 165483 (RU). Стационарная снегоплавильная установка / **М.М. Замалеев**, В.И. Шарапов, И.В. Губин, В.А. Павлов, И.В. Япаров // Бюл. изобретений. – 2016. - № 29.
52. Патент 164974 (RU). Тепловая электрическая станция / **М.М. Замалеев**, В.И. Шарапов, И.В. Губин, В.А. Павлов, И.В. Япаров // Бюл. изобретений. – 2016. - № 27.
53. Патент 165933 (RU). Система водоснабжения / **М.М. Замалеев**, В.И. Шарапов, И.В. Губин, В.А. Павлов, И.В. Япаров // Бюл. изобретений. – 2016. - № 31.
54. Патент 181074 (RU). Газоохладитель генератора / **М.М. Замалеев**, И.А. Марков, В.И. Шарапов // Бюллетень изобретений. – 2018. - № 19.
55. Патент 193148 (RU). Узел плавления установки по переработке полиэтилена и полипропилена / В.И. Шарапов, **М.М. Замалеев**, А.В. Абрамов // Бюл. изобретений. – 2019. - № 29.
56. Патент 200179 (RU). Водогрейный котел / В.И. Шарапов, **М.М. Замалеев**, А.В. Абрамов, А.А. Яковлев // Бюл. изобретений. - 2020. - № 28.
57. Патент 208485 (RU). Узел плавления установки по переработке полиэтилена и полипропилена / **М.М. Замалеев**, Д.Ф. Хусаинова, А.В. Абрамов, А.А. Яковлев, А.И. Хусаинов // Бюл. изобретений. - 2021. - № 36.
58. Патент 203525 (RU). Узел плавления установки по переработке полиэтилена и полипропилена / **М.М. Замалеев**, А.В. Абрамов, А.А. Яковлев // Бюл. изобретений. - 2021. - № 10.
59. Патент 2775611 (RU). Тепловая электрическая станция / **М.М. Замалеев**, А.И. Хусаинов, Д.Ф. Хусаинова, А.В. Абрамов, А.А. Яковлев // Бюл. изобретений. - 2022. - № 19.
60. Патент 2791918 (RU). Котельная установка / **М.М. Замалеев**, Р.И. Камалова, М.А. Малешина, В.А. Трусова // Бюл. изобретений. - 2023. - № 8.
61. Патент 2789945 (RU). Тепловая электрическая станция, работающая на твердых коммунальных отходах / **М.М. Замалеев**, М.А. Малешина, В.А. Трусова, С.Л. Носков // Бюл. изобретений. - 2023. - № 5.
62. Патент 2789762 (RU). Узел вакуумной деаэрации / О.В. Пазушкина, М.В. Золин, **М.М. Замалеев**, П.И. Калабановский // Бюл. изобретений. - 2023. - № 4.
63. Патент 2789761 (RU). Устройство утилизации отходов резины / **М.М. Замалеев**, О.В. Пазушкина, А.В. Абрамов, Ю.Р. Абайдуллина // Бюл. изобретений. - 2023. - № 4.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

64. **Замалеев М.М.** Программа для ЭВМ: «Расчет показателей тепловой экономичности ТЭЦ в соответствии с РД 34.08.552-93» / М.М. Замалеев, В.И. Шарапов, И.В. Губин, В.А. Павлов, И.В. Япаров // Свид. о госу­дарств. регистр. программы для ЭВМ 2016662635 / заре­гистр. в реестре программ для ЭВМ 16.11.2016.
65. **Замалеев М.М.** Программа для ЭВМ: «Расчет показателей тепловой экономичности ТЭЦ в соответствии с РД 34.08.552-95» / М.М. Замалеев, В.И. Шарапов, И.В. Губин, В.А. Павлов, И.В. Япаров // Свид. о госу­дарств. регистр. программы для ЭВМ 2016662634 / заре­гистр. в реестре программ для ЭВМ 16.11.2016.

Замалеев Мансур Масхутович

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОФИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ ЗА СЧЕТ РАСШИРЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛА ГОРОДСКИХ ТЭЦ

АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание учёной степени доктора технических наук

Подписано в печать 14.03.2025 г. Формат 60x84^{1/16} Печать плоская. Усл. печ. л. 2,33. Тираж 100 экз. Заказ № 23
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34. Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ