



ПОЛИТЕХ
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

На правах рукописи

КОЛБАНЦЕВА ДАРЬЯ ЛЬВОВНА

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЭЦ ПРИ ПРОИЗВОД-
СТВЕ ВОДОРОДА МЕТОДОМ ГАЗИФИКАЦИИ ТВЕРДЫХ КОМ-
МУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ**

2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидат технических наук

Санкт-Петербург

2025

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель: **Аникина Ирина Дмитриевна**
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Яковлев Павел Викторович** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Теплоэнергетика и теплотехника» Энергетического факультета, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», г. Санкт-Петербург

Колибаба Ольга Борисовна - кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Энергетика теплотехнологий и газоснабжение», федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина», г. Иваново

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва.

Защита состоится «16» декабря 2025 года в 15 часов 00 минут на заседании Диссертационного совета У.2.4.6.41 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, Главный учебный корпус, ауд. 118.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте www.spbstu.ru.

Автореферат разослан «____» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета У.2.4.6.41
доктор технических наук,
старший научный сотрудник



Куколев Максим Игоревич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Существенным фактором, негативно влияющим на экологическую безопасность населения Российской Федерации (РФ), является неуклонное увеличение объема образования отходов производства и потребления, при относительно невысоком уровне их утилизации. Так, в период с 2019 по 2022 гг. общий прирост объема образования отходов составил 16,3%, в то время как средний уровень утилизации не превышал 46–50%, при этом, на повторное использование направлялось лишь 18–30%, а объемы размещения отходов непрерывно увеличивались.

Согласно нормативным документам РФ, одним из самых современных и наиболее перспективных методов утилизации твердых коммунальных отходов (ТКО) является производство альтернативного твердого топлива из высококалорийной части ТКО. Кроме того, переход от значительной доли захоронения к эффективной утилизации с высокой долей вторичной переработки позволит не только повысить уровень экономичности использования природных ресурсов, но и снизить нагрузку на окружающую среду. Это является особенно актуальным в условиях глобальных изменений климата, а также возрастающей экономической активности как в РФ, так и в мире.

При интеграции комплекса по производству и использованию альтернативного топлива на электростанции можно добиться комплексного решения научной проблемы: оптимизировать режимы работы электростанций, повысив тем самым эффективность потребления топлива, а также перевести теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) в режим производства, например водорода с меньшей себестоимостью за счет использования вторичных ресурсов отходов и низкопотенциальной теплоты. Дополнительно, выработанный водород возможно использовать в качестве топлива ТЭЦ взамен неэкологичных природных топлив.

Анализ современного состояния исследований в данной области. Во всём мире проводятся исследования возможности экономически выгодного производства безуглеродного топлива и эффективности утилизации отходов, а также оценивается экономическая эффективность отдельных методов в условиях различных энергосистем. Так, в частности, известны работы Mulder M. (2018 г.), Liu B. (2020 г.), Zhang D. (2016 г.), Tang Z. (2020 г.), Majstrović G. (2023 г.), Font-Palma C. (2021 г.), Strbac G. (2020 г.). Проводятся исследования в части анализа влияния изменения морфологического состава отходов на эффективность процесса газификации ТКО [Acevedo J. и др.].

Научные исследования в этой области проводятся и в РФ. Большое внимание развитию водородной энергетики уделяется в Национальном исследовательском университете "МЭИ" (г. Москва). Здесь под руководством Рогалева А. Н. и Рогалева Н. Д. проводятся исследования производства водорода из природного газа, его использования в высокотемпературных процессах, а также расчет себестоимости генерируемого водорода. Исследуются способы производства низкоуглеродного

водорода и электрической энергии, анализируется конкурентоспособность при переходе на водородную энергетику под руководством Гаши Е.Г. Также вопросы интеграции производства водорода методом электролиза на атомные станции активно прорабатываются в Саратовском государственном техническом университете под руководством Аминова Р.З.

Большое внимание уделяется технико-экономическим основам производства водорода различными методами: электролизом [Филимонова А.А., и др.], пиролизом метана [Дубровская Е.С.] (Казанский государственный энергетический университет). Предлагаются решения по внедрению установок для производства водорода на действующих энергообъектах в условиях различных энергосистем [Коптева А. и др.] (Санкт-Петербургский горный университет). Исследуется мировой и российский опыт утилизации отходов для нужд энергоснабжения [Тугов А. Н.] (ОАО "Всероссийский теплотехнический институт" (г. Москва)), разрабатываются методические вопросы энергетического использования ТКО и продуктов их газификации [Зысин Л. В.], а также анализируются режимные параметры установок газификации ТКО [Шабуров Е.Л.] (Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого).

Однако ряд вопросов требует дополнительного анализа: вопросы утилизации сбросной теплоты, отводимой от синтез-газа при его производстве, а также подачи пара на реакцию доокисления оксида углерода не проработаны в достаточной степени; отсутствует методическая база по оценке эффективности интеграции комплекса по производству синтез-газа на тепловой электростанции (ТЭС).

Цель исследования: разработка метода оценки повышения эффективности работы когенерационной электростанции с установками по производству синтез-газа и утилизацией ТКО.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Проанализировать существующие способы утилизации ТКО. Определить наиболее перспективные способы утилизации ТКО в условиях производства электрической энергии и теплоты на ТЭЦ для интеграции такого комплекса;
2. Разработать схему интеграции комплекса по производству синтез-газа на когенерационной ТЭЦ с учетом особенностей производства каждого вида продукции;
3. Разработать имитационные модели ТЭЦ с включением в тепловую схему установок по производству водорода из синтез-газа. Произвести анализ режимов работы ТЭЦ, работающей в цикле с производством водорода;
4. Разработать методику оценки эффективности внедрения установки по производству синтез-газа в тепловую схему когенерационной ТЭЦ. Оценить эффективность внедрения.

Соответствие паспорту специальности. Работа соответствует паспорту специальности *в части направления исследования*: п. 6 «Научные основы повышения эффективности использования энергетических ресурсов в теплотехническом оборудовании и использующих теплоту системах и установках»; п. 7 «Оптимизация

схем теплоэнергетических установок и систем для генерации и трансформации энергоносителей, в том числе, основанных на принципах их комбинированного производства»; п. 8 «...Совершенствование методов расчета и оптимизация параметров использующих теплоту технологических процессов, оборудования и систем».

Научная новизна:

1. Разработана схема подключения комплекса по производству синтез-газа из ТКО в тепловую схему когенерационной ТЭЦ;
2. Разработаны математические модели когенерационных ТЭЦ при работе в цикле с производством синтез-газа;
3. Разработана методика оценки эффективности внедрения установки по производству синтез-газа в тепловую схему когенерационной ТЭЦ.

Теоретическая и практическая значимость работы.

1. Разработана методика, позволяющая выявить резервы повышения энергетической эффективности существующих когенерационных энергоблоков путём интеграции с комплексом по производству синтез-газа и его использованием в различных целях. Разработанная методика позволяет выполнить оценку эффективности интеграции комплекса в тепловую схему ТЭЦ на основании анализа существующего баланса выработки теплоты и электроэнергии с последующим выбором энергоблоков, для которых интеграция даст наибольший энергетический эффект;
2. Предложена схема модернизации энергоблоков для включения в их состав комплекса по производству синтез-газа из ТКО.

Разработанные материалы могут применяться как на существующих объектах генерации для оптимизации режимов работы, так и для вновь проектируемых.

Методология и методы исследований. В работе применялись методы термодинамического анализа энергоустановок, математического моделирования и технико-экономических расчетов. Был применен программный комплекс САПР «United Cycle», а также САПР «Boiler Designer».

Объект исследования – тепловая электрическая станция при комбинированной работе с комплексом по производству синтез-газа.

Предмет исследования – тепловые процессы, протекающие при эксплуатации основного и вспомогательного оборудования ТЭЦ при комбинированной работе с комплексом по производству синтез-газа.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика оценки эффективности внедрения установки по производству синтез-газа в тепловую схему ТЭЦ;
2. Схема подключения комплекса по производству водорода из ТКО в тепловую схему когенерационной ТЭЦ;
3. Математические модели ТЭЦ с производством в цикле электрической энергии, теплоты и синтез-газа.

Достоверность результатов исследования обеспечивается использованием апробированных методов математического моделирования тепловых схем

электростанций и валидацией разработанных моделей с использованием данных автоматизированной системы управления действующих ТЭЦ ПАО «ТГК-1».

Апробация результатов. Материалы докладывались и обсуждались на научных конференциях: международной научной конференции по энергетике, экологии и строительству (ЕЕСЕ – 2019); XLVIII конференции «Неделя науки СПбПУ» (2019 г.); международной научно-практической конференции «Современные технологии и экономика энергетики» (2020, 2021, 2022, 2023 гг.); международной научной электроэнергетической конференции (ISEPC-2021); седьмой всемирный конгресс «Альтернативная энергетика и экология» (WCAEE-2023).

Разработанные схемные решения и математические модели использованы при проведении научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы «Исследование возможности использования водорода в технологических схемах ТЭЦ и производственных площадках станций» для ТЭЦ ПАО «ТГК-1» (2021–2022 гг.).

Связь работы с научными программами и грантами. Диссертационное исследование выполнено при поддержке программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» в 2022 и в 2023 годах. Тема проекта 2022 г. «Переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике путем генерации, хранения и потребления водорода в технологических схемах электростанций с применением технологий газификации твердых коммунальных отходов и теплонасосных установок» (Соглашение 075-15-2021-1333, дата 30.09.2021), тема проекта 2023 года «Оптимизация работы ТЭЦ в условиях достижения технологического суверенитета РФ и концепции Индустрии 4.0» (Соглашение 075-15-2023-380 от 20 февраля 2023 г.). Кроме того, исследование выполнено при поддержке гранта Комитета по науке и высшей школе Санкт-Петербурга 2021 года для студентов и аспирантов вузов, отраслевых и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга.

Публикации. По теме диссертационного исследования опубликовано **24** работы, в том числе: 6 статей – в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, 7 статей – в журналах, индексируемых Scopus и WoS (квартиль Q1 и Q2), 9 статей – в сборниках международных конференций. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач исследования; в выборе объекта и предмета исследования; в разработке принципиально новых схем, методик и рекомендаций по интеграции комплекса по производству синтез-газа на ТЭЦ; в обработке, обобщении полученных результатов и формулировке основных выводов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (156 наименований) и четырёх приложений. Работа содержит 211 страниц основного текста, 43 таблицы, 48 рисунков. Общий объем работы – 223 страницы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулирована и обоснована актуальность темы, определены цель и задачи исследования, приведены основные выносимые на защиту положения, научная и практическая ценность работы, дано описание структуры диссертации.

В первой главе проанализированы проблемы и существующие способы утилизации ТКО. Отдано предпочтение использованию метода термической утилизации - газификации ТКО с получением в процессе газификации синтез-газа.

Рассмотрены различные способы производства водорода из синтез-газа. Предложено использование технологии доокисления угарного газа до углекислого с дополнительным производством водорода и короткоцикловой адсорбции (КЦА) с целью извлечения полученного водорода. Данная технология применяется также при извлечении водорода из синтез-газа, произведенного методом паровой конверсии метана. Показана возможность внедрения водородогенерирующей установки в тепловую схему когенерационной электростанции.

Выявлено три основных направления повышения эффективности работы когенерационной ТЭЦ (см. Рисунок 1):

1. Производство синтез-газа из ТКО методом газификации с дальнейшим использованием генерируемого синтез-газа в качестве топлива энергетических котлов;
2. Производство синтез-газа из ТКО методом газификации с дальнейшим извлечением водорода и его использованием в качестве топлива энергетических котлов и газотурбинных установок (ГТУ);
3. Производство синтез-газа из природного газа методом паровой конверсии метана с дальнейшим извлечением водорода и его использованием в качестве топлива энергетических котлов и ГТУ.

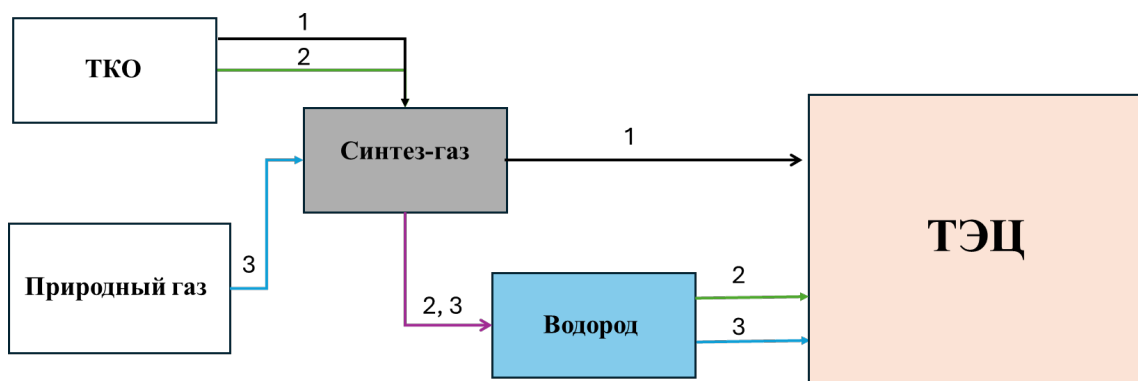


Рисунок 1. – Блок-схема вариантов повышения эффективности работы когенерационной ТЭЦ

Для первого варианта произведена оценка технических показателей теплофикационных установок с помощью моделирования и расчета тепловых схем в лицензированной программе Boiler Designer. На рисунке 2 представлена соответствующая расчетная модель, состоящая из газификатора, парового котла, турбины и вспомогательного оборудования. Подогреватель высокого давления турбины

представляет из себя водо-водяной теплообменник, греющей средой для которого является охлаждающая среда на выходе из газификатора.

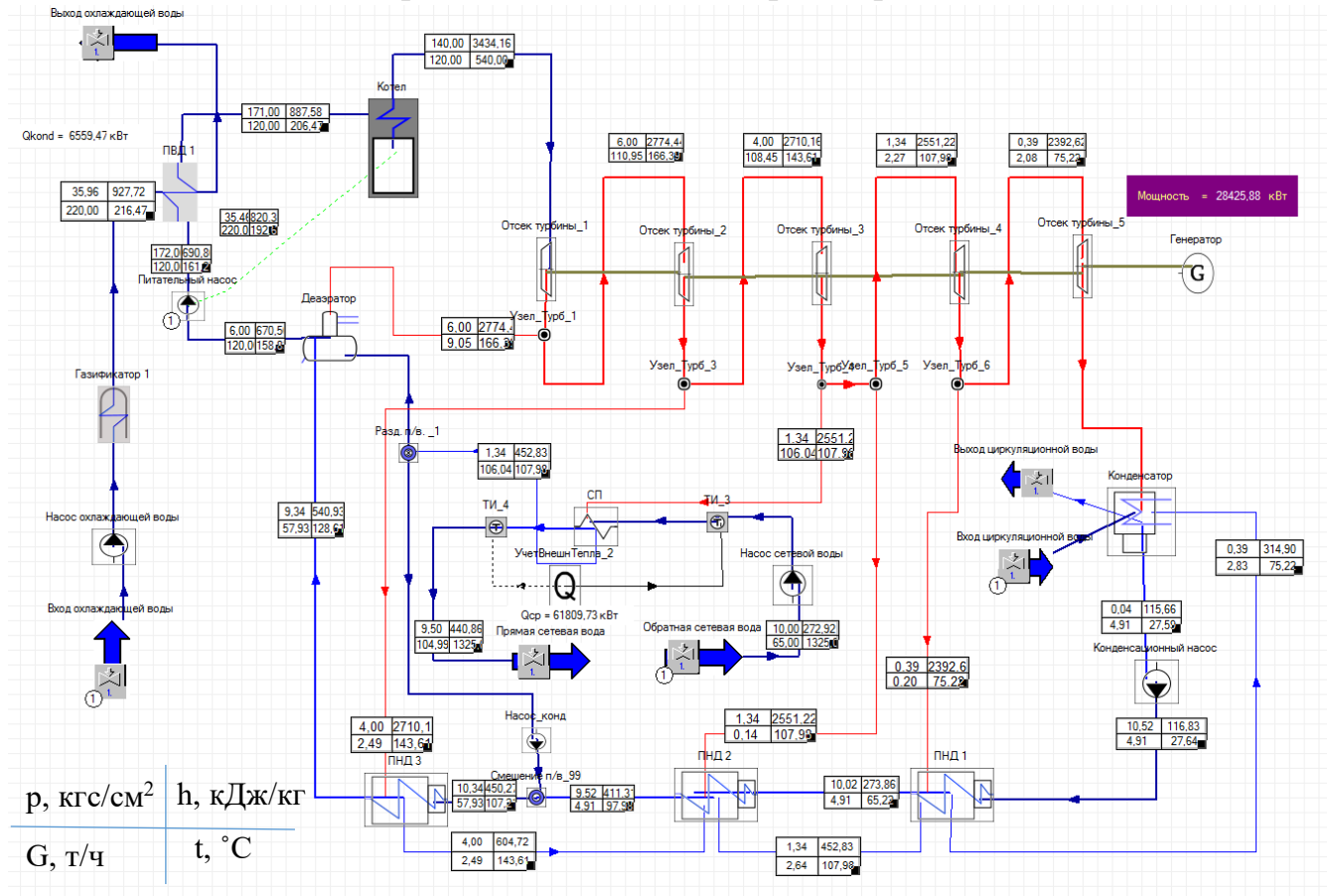


Рисунок 2. –Теплофикационная установка, смоделированная в программе Boiler Designer

Использование такой схемы позволяет снизить суммарный расход природного газа (при сохранении объемов отпускаемой продукции – теплоты и электрической энергии) или повысить выработку теплоты и/или электрической энергии (при сохранении расхода природного газа ТЭЦ). Так при использовании в качестве альтернативного топлива половины от всего образующегося объема ТКО г. Санкт-Петербурга для производства дополнительной электроэнергии и теплоты (при сохранении расхода природного газа ТЭЦ) электрическая мощность, генерируемая в паротурбинной установке составит 28,43МВт, теплота – 61 МВт (см. Рисунок 2).

Однако, при таком варианте сжигания синтез-газа в котлоагрегатах необходимо обеспечить контроль (и при необходимости очистку) всего объема дымовых газов ТЭЦ для минимизации выбросов загрязняющих веществ, что приведет к повышению операционных затрат. Кроме того, сжигается ценный вид продукта – водород, продажа которого может принести дополнительный доход электростанции.

Наиболее привлекательным является вариант создания установок по производству водорода из синтез-газа, полученного из ТКО методом газификации с утилизацией сбросной теплоты на базе ТЭЦ, что будет способствовать решению ряда глобальных проблем, включая:

- повышение эффективности использования топлива ТЭЦ;
- развитие производства и потребления водорода;
- повышение эффективности действующего когенерационного производства;
- повышение уровня использования сбросной теплоты.

В отличие от способа получения синтез-газа методом паровой конверсии метана, данный вариант также частично решает глобальную проблему утилизации ТКО (экологический эффект), поэтому дальнейшее исследование сконцентрировано на наиболее перспективном и экологически привлекательном из рассматриваемых путей повышения эффективности работы ТЭЦ: производство водорода из синтез-газа, полученного методом газификации ТКО и интеграция такой установки в тепловую схему действующей когенерационной ТЭЦ.

Вторая глава посвящена анализу вариантов использования, хранения и транспортировки водорода на ТЭС. Разработаны схемы генерации водорода из ТКО методом газификации, хранения и последующего использования водорода на ТЭС.

Установка по переработке ТКО и получению водорода предполагает непрерывность процесса, в то время как потребность в водороде будет определяться конечным потребителем. При небалансе производства и продажи товарного водорода возможно хранение сжиженного водорода или использование водорода в качестве топлива для ТЭЦ, когда водород в масштабах производства на рынке не пользуется спросом.

С точки зрения использования водорода в качестве топлива предложено рассматривать технологию сжигания смеси водорода и природного газа в ГТУ и газомазутных паровых котлах (в объемных долях 20% и 80%, соответственно) в связи с минимально требуемыми конструктивными изменениями оборудования.

В случае производства водорода непосредственно на ТЭЦ возможен его подмес в трубопроводы природного газа, поступающего к генерирующему оборудованию действующей газифицированной ТЭЦ и использование смеси в качестве топлива, а также ликвидация дорогостоящего склада хранения сжиженного водорода.

Газификации может подвергаться только предварительно подготовленное топливо (RDF-топливо). Исходя из морфологического состава ТКО, можно определить процент извлечения RDF-топлива из ТКО, поступающих на сортировку согласно территориальным схемам по обращению с отходами для каждого региона РФ.

Схема интеграции производства синтез-газа методом газификации ТКО и водорода в процессе работы когенерационной ТЭЦ представлена на рисунке 3. В процессе газификации ТКО образуется синтез-газ, представляющий собой смесь газов CO и H₂, из которого в дальнейшем может быть выделен водород. Синтез-газ характеризуется широким диапазоном соотношения окиси углерода и водорода (25–75% по объему), поэтому возникает необходимость дооборудования производства водорода блоками концентрирования, где происходит доокисление CO до CO₂ путем подачи пара, и дальнейшее улавливание CO₂ методом КЦА.

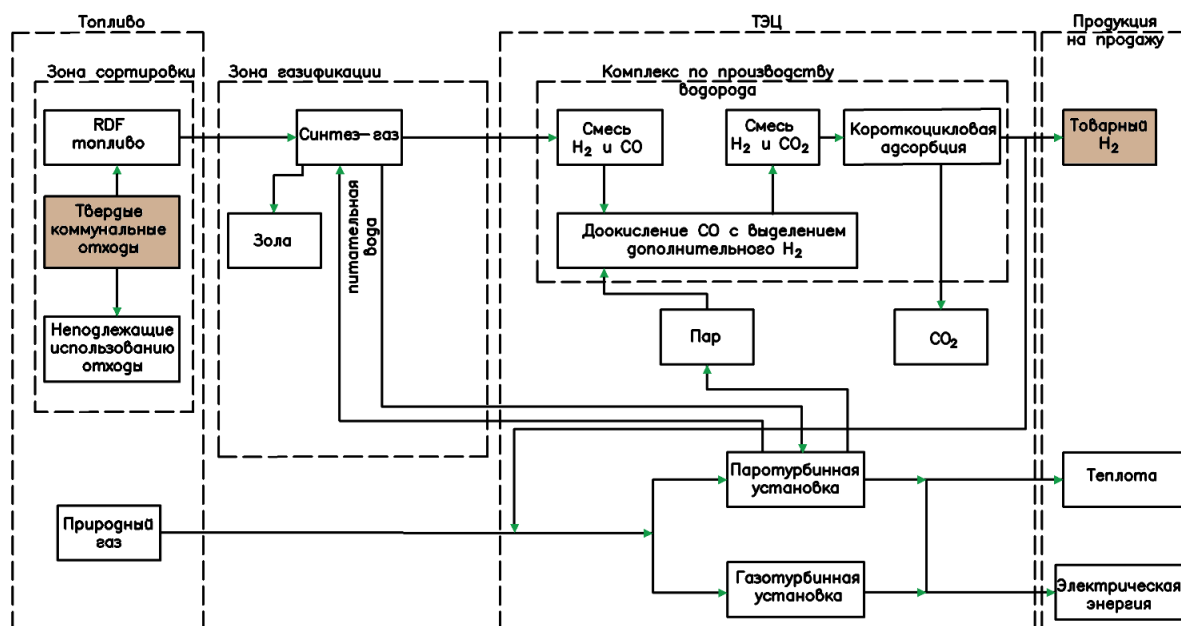


Рисунок 3. – Схема интеграции комплекса по производству синтез-газа в тепловую схему когенерационной ТЭЦ

Разработанная схема также справедлива в случае производства водорода методом паровой конверсии метана. В таком случае будет отсутствовать зона сортировки и зона газификации.

В третьей главе для оценки синергетического эффекта от работы электростанции совместно с комплексом по производству водорода из синтез-газа предлагается использование методов математического моделирования режимов работы ТЭЦ. Выбраны перспективные объекты моделирования в условиях г. Санкт-Петербурга: Северная ТЭЦ-21 и Южная ТЭЦ-22 ПАО «ТГК-1».

Моделирование производилось с помощью программного комплекса САПР «United Cycle». Разработанные модели были валидированы. В качестве контрольных параметров для валидационного базиса взяты статистические данные о летнем и зимнем режимах работы ТЭЦ-21 и ТЭЦ-22. Средняя величина отклонения контрольных параметров от данных имитационного моделирования для рассматриваемых режимов составила 1,1% для ТЭЦ-21 и 1,39% для ТЭЦ-22.

Отличия разработанной имитационной модели ТЭЦ с интеграцией комплекса по производству водорода от модели традиционного энергоблока ТЭЦ заключаются в следующем: часть питательной воды нагревается за счет контура охлаждения синтез-газа; предусматривается отбор пара на выходе из цилиндра высокого давления (ЦВД) или на выходе из цилиндра среднего давления (ЦСД) на реакцию доокисления синтез-газа, а также из коллектора острого пара; отбираемый пар компенсируется добавлением подпиточной воды в конденсатор, для которой необходимо осуществить химводоочистку (ХВО) и предварительный подогрев до 30°C.

Для интеграции комплекса по производству водорода в Южную ТЭЦ-22 был выбран паротурбинный блок с турбиной Т-250/300-240. Отбор пара от турбины

осуществляется после ЦСД как для зимнего, так и для летнего режима. Расчетная схема модели с установкой по производству водорода, интегрированной в первый энергоблок Южной ТЭЦ-22, показана на рисунке 4.

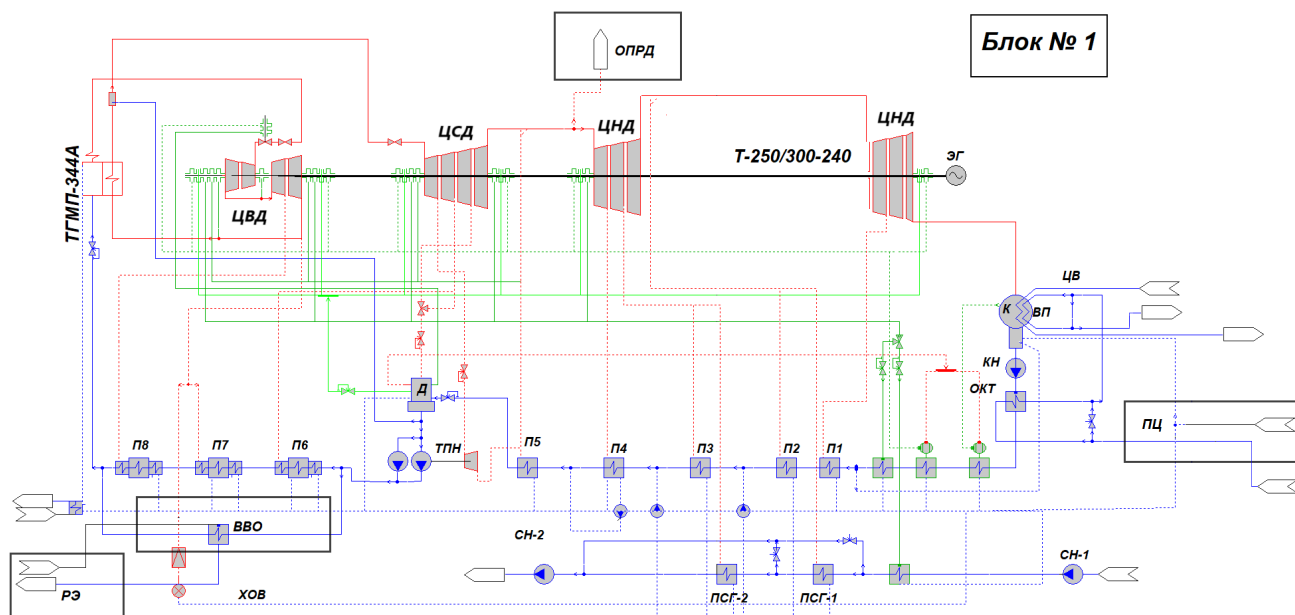


Рисунок 4. – Расчетная тепловая схема модели энергоблока №1 Южной ТЭЦ с интеграцией комплекса по производству водорода из ТКО: ЭГ – электродвигатель; ВП – теплофикационный встроенный пучок конденсатора; ЦВ – циркуляционная

вода; П1-П5 – подогреватели низкого давления; П6-П8 – подогреватели высокого давления; ТПН – турбоприводный питательный насос; СН-1, СН-2 – сетевые насосы; ОКТ – охладитель конденсата турбины; К – конденсатор; КН – конденсатный насос; ПСГ-1, ПСГ-2 – подогреватели сетевой воды горизонтальные; Д – деаэратор; ХОВ – химобессоленная вода; РЭ – раствор этиленгликоля; ПЦ – подпитка цикла (компенсация отпуска пара на производство водорода); ОПРД – отпуск пара на реакцию доокисления окиси углерода; ВВО – водо-водяной охладитель синтез-газа, ЦВД – цилиндр высокого давления; ЦСД – цилиндр среднего давления; ЦНД – цилиндр низкого давления.

Для интеграции комплекса по производству водорода в Северную ТЭЦ-21 также был выбран энергоблок с турбиной Т-100/120-130–3. Отбор пара на реакцию доокисления для зимнего режима осуществлен на выходе из ЦВД (см. рисунок 5), для летнего – из коллектора острого пара.

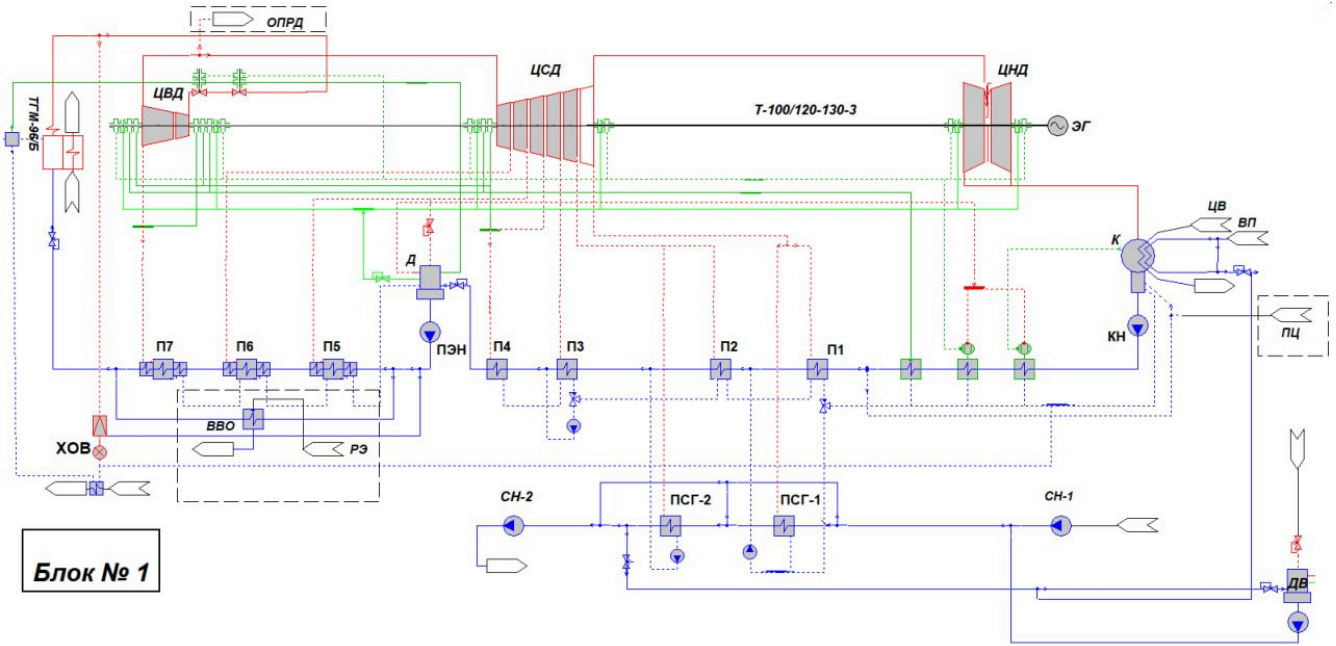


Рисунок 5. – Расчетная тепловая схема модели энергоблока №1 Северной ТЭЦ с интеграцией комплекса по производству водорода из ТКО, смоделированная в САПР «United Cycle»

Моделирование осуществлялось для трех вариантов содержания водорода в генерируемом синтез-газе – 25%, 50% и 75%. Для оценки целесообразности утилизации сбросного тепла газификатора, дополнительно был посчитан режим, при котором охладитель, использующий теплоту синтез-газа для подогрева питательной воды, отключен. В данном режиме происходит только подача пара на нужды реакции доокисления угарного газа.

Четвертая глава посвящена разработке метода оценки эффективности установки по производству синтез-газа на когенерационную ТЭЦ и определению энергетического, экологического и экономического эффектов. Разработанная методика включает оценку объемов водорода, который можно получить из заданного количества ТКО и дальнейшее имитационное моделирование объекта исследования.

Так, массовый расход генерируемого из ТКО синтез-газа ($V_{s.g.}, \frac{\text{т}}{\text{ч}}$) традиционно предлагается определять как:

$$V_{s.g.} = (1 - m_{ash}) \cdot V_{RDF} = (1 - m_{ash}) \cdot m_{RDF} \cdot \frac{V_{MSW}}{8760}, \quad (1)$$

где m_{ash} – массовая доля золы, образующейся при газификации RDF-топлива; m_{RDF} – массовая доля извлечения из ТКО фракций, подходящих для получения RDF-топлива (на основе статистических данных конкретного региона РФ); V_{MSW} – масса ТКО, образующихся в регионе за год, $\frac{\text{т}}{\text{год}}$.

Во время процесса газификации происходит отдача теплоты газа для полезного нагрева питательной воды. Поэтому было определено выражение для оценки теплового потока, необходимого для охлаждения синтез-газа ($Q_{s.g.}, \text{кВт}$):

$$Q_{s.g.} = \overline{C_{s.g.}} \cdot \frac{V_{s.g.}}{3,6} \cdot \Delta t, \quad (2)$$

где $\overline{C_{s.g.}}$ – средняя теплоемкость синтез-газа, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C}}$; Δt – изменение температуры синтез-газа при отдаче тепла, $^{\circ}\text{C}$.

Средняя теплоемкость синтез-газа определяется как сумма произведений массовых долей на удельную теплоемкость каждого компонента смеси. Расходы генерируемого водорода ($V_{H_2(s.g.)}, \frac{\text{т}}{\text{ч}}$) и монооксида углерода ($V_{CO(s.g.)}, \frac{\text{т}}{\text{ч}}$), содержащихся в синтез-газе, полученном из RDF-топлива методом газификации, зависят от морфологического состава ТКО, поэтому меняются в значительном диапазоне и могут быть определены по следующим формулам, соответственно:

$$V_{H_2(s.g.)} = m_{H_2(s.g.)} \cdot V_{s.g.}, \quad (3)$$

$$V_{CO(s.g.)} = m_{CO(s.g.)} \cdot V_{s.g.} \quad (4)$$

В свою очередь, массовые доли соответствующих компонентов синтез-газа могут быть получены с учетом объемных долей их содержания и плотностей:

$$m_{H_2(s.g.)} = \frac{v_{H_2} \cdot \rho_{H_2}}{v_{H_2} \cdot \rho_{H_2} + v_{CO} \cdot \rho_{CO}}, \quad (5)$$

$$m_{CO(s.g.)} = \frac{v_{CO} \cdot \rho_{CO}}{v_{H_2} \cdot \rho_{H_2} + v_{CO} \cdot \rho_{CO}}, \quad (6)$$

где v_{H_2} и v_{CO} – объемные доли водорода и монооксида углерода в составе синтез-газа, соответственно; ρ_{H_2} и ρ_{CO} – средние плотности водорода и монооксида углерода, соответственно, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Химическая формула реакции доокисления монооксида углерода до углекислого газа путем подачи водяного пара имеет следующий вид:



Принимая во внимание молярную массу компонентов, из 1 г. CO, который входит в состав образующегося синтез-газа, дополнительно образуется: 0,071 г. водорода, 1,57 г. углекислого газа, при этом потребуется 0,642 г. пара.

Результаты расчетов для годового объема ТКО, генерируемых в г. Санкт-Петербург, представлены в таблице 1.

Таблица 1. - Оценка объемов генерации водорода методом газификации ТКО на ТЭЦ для г. Санкт-Петербург

Параметр	Объемное содержание водорода в синтез-газе, %		
	25	50	75
Расход RDF топлива (V_{RDF}), т/ч	86,96		
Расход генерируемого синтез-газа ($V_{s.g.}$), т/ч	78,26		
Расход водорода из синтез-газа ($V_{H_2(s.g.)}$), т/ч	1,23	3,74	10,24
Тепловой поток, который необходим для охлаждения синтез-газа ($Q_{s.g.}$), МВт	11,6	15,3	25,3
Необходимое количество пара для доокисления CO (V_{H_2O}), т/ч	49,48	47,91	43,73
Суммарный расход генерируемого водорода после КЦА (V_{H_2}), т/ч	6,72	8,97	14,95

В качестве показателя оценки тепловой экономичности ТЭЦ при внедрении установки по производству синтез-газа предложен коэффициент использования теплоты топлива. Оценка приращения КИТТ ТЭЦ за счет интеграции комплекса по производству синтез-газа позволит принять решение о целесообразности реализации данного мероприятия на той или иной электростанции.

Для рассматриваемых электростанций, дополнительным продуктом, помимо традиционных электрической энергии и теплоты, является водород, а в качестве источника теплоты дополнительно используется теплота генерируемого синтез-газа:

$$\eta_{\text{ИТТ}} = \frac{\sum Q_T \cdot n_1 + \sum N_{\text{Э}} \cdot n_2 + G_{H_2} \cdot Q_{H_2}^p \cdot n_3}{\sum B_{\text{ПГ}} \cdot Q_{\text{ПГ}}^p \cdot n_4 + \sum B_{\text{синт}} \cdot Q_{\text{синт}}^p \cdot n_5}, \quad (8)$$

где $\sum Q_T$ – суммарная тепловая нагрузка сетевых подогревателей, пиковых водогрейных котлов, встроенных пучков и охладителей конденсата турбин, МВт; $\sum N_{\text{Э}}$ – отпущенная электроэнергия, МВт; $Q_{H_2}^T = G_{H_2} \cdot Q_{H_2}^p$ – теплота товарного водорода (водорода не используемого в цикле в качестве топлива), равная произведению расхода водорода (G_{H_2} , кг/с) и его низшей теплотворной способности ($Q_{H_2}^p$, МДж/кг), МВт; $\sum B_{\text{ПГ}}$ – суммарный расход природного газа, кг/с; $Q_{\text{ПГ}}^p$ – низшая теплотворная способность природного газа, МДж/кг; $\sum B_{\text{синт}}$ – суммарный расход генерируемого синтез-газа, кг/с; $Q_{\text{синт}}^p$ – низшая теплотворная способность генерируемого синтез-газа, МДж/кг, n_{1-5} – время работы соответствующего генерирующего оборудования в году, с.

Использование сбросного тепла газификатора позволяет повысить КИТТ за счет снижения суммарного расхода природного газа ($Q_{\text{ПГ}}$) (при сохранении объемов отпускаемой продукции (Q_T , $N_{\text{Э}}$, $Q_{H_2}^T$)) или повысить выработку теплоты и/или электрической энергии (Q_T , $N_{\text{Э}}$) (при сохранении расхода природного газа ТЭЦ ($Q_{\text{ПГ}}$) и товарного водорода ($Q_{H_2}^T$)).

Использование данного критерия также позволяет рассмотреть эффективность интеграции всех путей повышения эффективности работы когенерационной ТЭЦ, предложенных в главе 1 (см. рисунок 1).

Расчёты подтвердили гипотезу об отсутствии влияния перевода тепловой электростанции с когенерации на цикл с производством электрической энергии, теплоты и водорода на ее характерные режимы работы (производство продукции – теплоты и электрической энергии осталось на номинальном уровне).

Среднегодовые значения КИТТ (см. рисунок 6) подтверждают, что вне зависимости от работы охладителя синтез-газа наблюдается повышение энергетической эффективности работы ТЭЦ-21 и ТЭЦ-22 относительно исходного режима при всех вариантах содержания водорода в генерируемом синтез-газе, а при интеграции охладителя синтез-газа наблюдается дополнительный положительный эффект. Максимальной возможный прирост КИТТ для ТЭЦ-21 составил от 12,66% (14,14% с установкой охладителя), а для Южной ТЭЦ – 7,29% (8,16% с установкой охладителя синтез-газа).

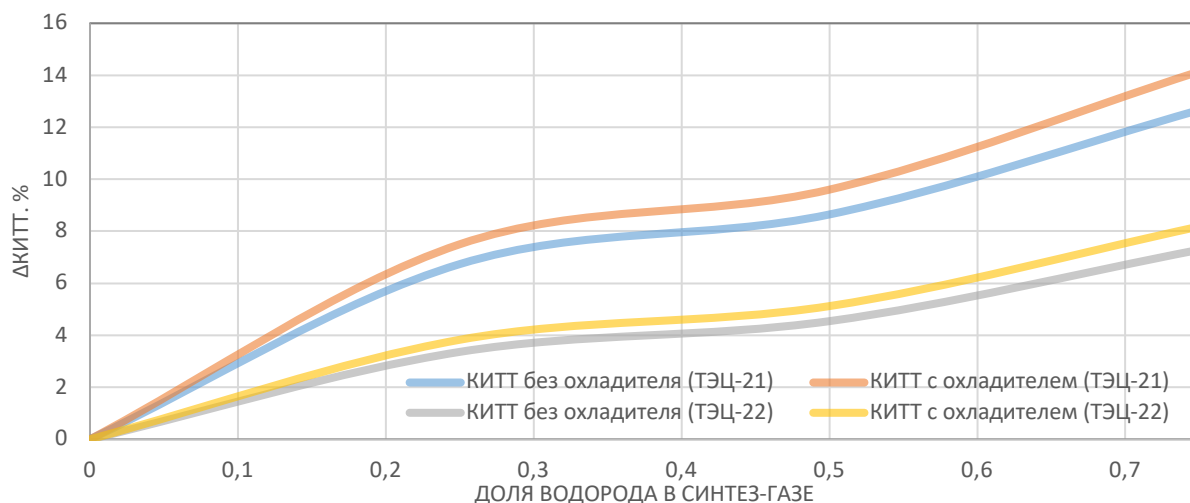


Рисунок 6. – Среднегодовые значения КИТТ ТЭЦ-21 и ТЭЦ-22 при интеграции комплекса по производству водорода

В работе произведен расчет снижения выбросов углекислого газа ТЭЦ при интеграции рассматриваемого комплекса. Сокращение может происходить по нескольким причинам: снижение использования природного газа за счет подмеса водорода к природному газу в количестве 20% об. и использование метан-водородной смеси в качестве топлива ТЭЦ; сокращение расхода топлива ТЭЦ за счет оптимизации режимов работы при переводе станции на работу в цикл с производством электрической энергии, теплоты и водорода.

На рассматриваемых ТЭЦ наблюдается положительный экологический эффект, а именно сокращение выбросов парниковых газов. На ТЭЦ-21 установленной электрической мощностью 500 МВт ежегодное сокращение может достигнуть до 56,14 тыс. тонн CO_2 . Использование сбросного тепла газификатора позволяет дополнительно снизить выбросы CO_2 до 57,57 тыс. тонн CO_2 в год. На ТЭЦ-22 установленной электрической мощностью 1365 МВт сокращение может достигнуть 112,44 тыс. тонн CO_2 (до 113,98 тыс. тонн CO_2 в год при использовании сбросного тепла).

Внедрение предлагаемого технического решения помимо решения задачи утилизации ТКО позволит производить водород, и производство водорода предлагаемым методом окажется в два раза дешевле, чем методом паровой конверсии метана (ПКМ) (см. Рисунок 7), который в настоящее время является самым распространенным и доступным по цене в мировой практике.

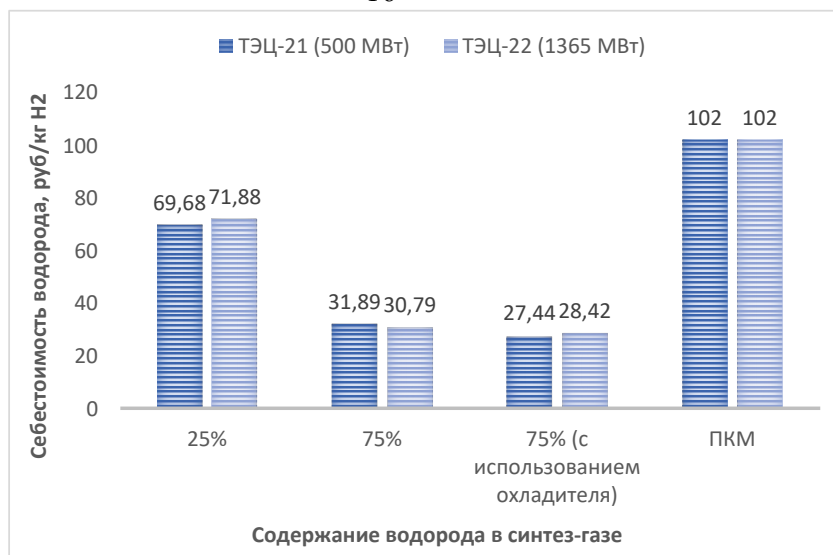


Рисунок 7. – Себестоимость производства водорода при интеграции комплекса на ТЭЦ-21 и ТЭЦ-22

Применение разработанной методики показало, что в условиях г. Санкт-Петербург следует отдать предпочтение Северной ТЭЦ-21 ПАО «ТГК-1» в связи с большим энергетическим эффектом от внедрения мероприятия.

В **заключении** приведены выводы:

1. Предложено использование метода газификации ТКО с получением в процессе газификации синтез-газа. Производство синтез-газа из половины ТКО г. Санкт-Петербурга и его дальнейшее использование в качестве топлива энергетических котлов на когенерационной электростанции показало прирост электрической мощности ТЭЦ на 28,43 МВт, теплоты на 61 МВт. Сделан вывод о необходимости создания установок по производству водорода из синтез-газа;

2. Предложено рассматривать технологию сжигания смеси водорода, полученного из синтез-газа, и природного газа в газовых турбинах и газомазутных паровых котлах в объемных долях 20% и 80% соответственно. Разработана схема интеграции комплекса по производству синтез-газа с выделением водорода на когенерационную ТЭЦ;

3. Созданы математические модели ТЭЦ-21 и ТЭЦ-22 г. Санкт-Петербурга с включением комплекса по производству водорода из синтез-газа. Средняя величина отклонения контрольных параметров от данных имитационного моделирования составила 1,1% для ТЭЦ-21 и 1,39% для ТЭЦ-22. Произведен анализ режимов работы ТЭЦ, работающей в цикле с производством водорода.

4. Сформулирована методика оценки эффективности внедрения установки по производству синтез-газа в тепловую схему когенерационной ТЭЦ. На ее основании определен энергетический эффект: максимальный рост КИТТ для ТЭЦ-21 составил 12,66% (14,14% с установкой охладителя синтез-газа), а для Южной ТЭЦ-22 – 7,29% (8,16 % с установкой охладителя). Показан положительный экологический и экономический эффект от внедрения установки.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Статьи, опубликованные в изданиях, входящих в Q1, Q2 Scopus и Web of Science Core Collection:

1. Analysis of Technologies for Hydrogen Consumption, Transition and Storage at Operating Thermal Power Plants / **D. Kolbantseva**, D. Treschev, M. Trescheva [et al.] // *Energies*. – 2022. – Vol. 15, No. 10.
2. Use of Heat Pumps in the Hydrogen Production Cycle at Thermal Power Plants / K. Kalmykov, I. D. Anikina, **D. Kolbantseva** [et al.] // *Sustainability*. – 2022. – Vol. 14, No. 13.
3. M. Treshcheva. Efficiency of Using Heat Pumps in a Hydrogen Production Unit at Steam-Powered Thermal Power Plants / M. Treshcheva, **D. Kolbantseva**, I. Anikina [et al.] // *Sustainability*. – 2023. – Vol. 15, No. 21. – P. 15204.
4. Improving the efficiency of chp plants through the combined production of hydrogen, heat and electricity / K. S. Kalmykov, **D. L. Kolbantseva**, D. A. Treschev [et al.] // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2024. – Vol. 51. – P. 49-61
5. Prospects for hydrogen production by the method of gasification of MSW at operating TPPs / **D. L. Kolbantseva**, D. A. Treshchev, K. S. Kalmykov [et al.] // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2024. – Vol. 51. – P. 96-106.
6. Analysis of the efficiency of utilizing low-potential heat from the hydrogen complex in the NPP'S power unit / Yu. A. Kolbantsev, **D. L. Kolbantseva**, I. D. Anikina, M. I. Kukolev // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2024. – Vol. 93. – P. 1250-1257.
7. Analysis of the regional potential and prospects for converting MSW into hydrogen based on TPPS (using the example of the Ural Federal District) / M. A. Treshcheva, **D. L. Kolbantseva**, I. D. Anikina [et al.] // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2024. – Vol. 95. – P. 329-339.

Публикации в изданиях RSCI:

1. Калютник, А. А. Утилизация твердых бытовых отходов на ТЭЦ г. Санкт-Петербурга / А. А. Калютник, Д. А. Трещев, **Д. Л. Поздеева** // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. – 2019. – Т. 25, № 3. – С. 59–70.

Публикации в отечественных изданиях, которые входят в международные реферативные базы данных и системы цитирования, считающиеся включенными в Перечень ВАК:

1. Повышение эффективности ТЭЦ за счет комбинированного производства водорода, теплоты и электроэнергии / К. С. Калмыков, **Д. Л. Колбанцева**, Д. А. Трещев [и др.] // *Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология*. – 2023. – № 4(409). – С. 68–84.
2. Перспективы производства водорода методом газификации ТКО на действующих ТЭС / **Д. Л. Колбанцева**, Д. А. Трещев, К. С. Калмыков [и др.] // *Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология*. – 2023. – № 6(411). – С. 126–142.

3. Анализ эффективности утилизации низкопотенциального тепла водородного комплекса на энергоблоке АЭС / Ю. А. Колбанцев, **Д. Л. Колбанцева**, И. Д. Аникина, М. И. Куколев // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2024. – № 4(421). – С. 68–85.

4. Анализ регионального потенциала и перспектив преобразования ТКО в водород на базе ТЭС (на примере Уральского федерального округа) / М. А. Трещева, **Д. Л. Колбанцева**, И. Д. Аникина [и др.] // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2024. – № 9(426). – С. 131–152.

Публикации в изданиях ВАК по научной специальности 2.4.6.:

1. Исследование двухконтурной теплофикационной ПГУ при её работе по тепловому графику / Д. А. Трещев, М. А. Трещева, **Д. Л. Колбанцева**, А. А. Калютник // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23, № 4. – С. 27–42.

2. Исследование оптимального коэффициента теплофикации ТЭЦ, работающей на альтернативном топливе / **Д. Л. Колбанцева**, Д. А. Трещёв, И. Д. Аникина, С. О. Кравченко // Энергетик. – 2025. -№1 -с. 31–37

В трудах конференций:

1. Research of the Combined-Cycle Cogeneration Plant's Behavior According to the Temperature Chart / D. A. Treshchev, M. A. Treshcheva, **D. L. Kolbantseva**, A. A. Kalyutik // Lecture Notes in Mechanical Engineering. – 2022. – P. 1-16.

2. Трещев, Д. А. Утилизация твердых бытовых отходов на ТЭЦ Г. Санкт-Петербурга с применением теплового насоса / Д. А. Трещев, **Д. Л. Поздеева** // Современные технологии и экономика в энергетике (МТЭЕ – 2020): материалы международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 23 апреля 2020 года. – Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2020. – С. 85–88.

3. Трещев, Д. А. Обоснование возможности получения тепловой и электрической энергии путем утилизации твердых бытовых отходов на ТЭЦ Г. Санкт-Петербурга / Д. А. Трещев, **Д. Л. Поздеева** // Неделя науки СПбПУ: Материалы научной конференции с международным участием. Институт энергетике, Санкт-Петербург, 18–23 ноября 2019 года / Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. – Санкт-Петербург: Политех-Пресс, 2020. – С. 175–177.

4. Treshcheva, M. Applying heat pumps to utilize municipal solid waste at St. Petersburg TPP / M. Treshcheva, D. Treshchev, **D. Pozdeeva** // E3S Web of Conferences: International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering, EECE 2019, Saint-Petersburg, 19–20 ноября 2019 года. Vol. 140. – Saint-Petersburg: EDP Sciences, 2019. – P. 04002.

5. **Колбанцева, Д. Л.** Перспективы использования водорода в качестве топлива на действующих ТЭС РФ / Д. Л. Колбанцева, Д. А. Трещев, М. А. Трещева // Современные технологии и экономика в энергетике: Материалы Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 27 апреля 2022 года. – Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – С. 115–117.

6. **Колбанцева, Д. Л.** Перспективы производства водорода из отходов на действующих ТЭЦ Г. Санкт-Петербурга / Д. Л. Колбанцева, Д. А. Трещев, М. А. Трещева // Современные технологии и экономика в энергетике: Материалы Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 27 апреля 2022 года. – Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – С. 118–120.

7. **Колбанцева, Д. Л.** Алгоритм выбора площадки действующей ТЭС для интеграции комплекса по производству водорода методом газификации ТКО / Д. Л. Колбанцева // Современные технологии и экономика в энергетике: Материалы Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 27 апреля 2023 года. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", 2023. – С. 152–154.

8. **Kolbantseva, D. L.** Research of a double-circuit cogeneration CCGT operating in a heat production mode / D. L. Kolbantseva, D. A. Treshchev, M. A. Treshcheva // Modern technologies and economics in energy MTEE - 2021: Материалы Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 29 апреля 2021 года. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", 2021. – Р. 74–76.

9. Трещев, Д. А. Использование показателя относительной экономии топлива при выборе оптимальной энергосистемы для теплофикационной ПГУ / Д. А. Трещев, М. А. Трещева, **Д. Л. Колбанцева** // Современные технологии и экономика в энергетике: Материалы Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 27 апреля 2022 года. – Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – С. 155–157.

Программы ЭВМ:

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024683852 Российская Федерация. Программа для оптимизации начальных параметров и структуры утилизационного контура теплофикационного парогазового энергоблока: № 2024681976: заявл. 24.09.2024: опубл. 14.10.2024 / И. Д. Аникина, Я. А. Владимиров, М. А. Трещева, **Д. Л. Колбанцева**; заявитель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого"