

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Объект авторского права
УДК 658.261:621.56

КЛЮЧИНСКИЙ
Владислав Петрович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ
ПОЛИГЕНЕРАЦИОННЫХ ТУРБОУСТАНОВОК
НА ОСНОВЕ НИЗКОКИПАЩИХ РАБОЧИХ ТЕЛ**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.14.04 – промышленная теплоэнергетика

Минск, 2024

Работа выполнена в учреждении образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого».

Научный руководитель

ОВСЯННИК Анатолий Васильевич,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Промышленная теплоэнергетика и экология» учреждения образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»

Официальные оппоненты:

РОМАНИЮК Владимир Никанорович,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция» Белорусского национального технического университета;

ЩЕМЕЛЕВ Александр Петрович,
кандидат технических наук, доцент,
заведующий научно-исследовательским сектором учреждения образования «Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий»

Оппонирующая организация

Учреждение образования «Государственный институт повышения квалификации и переподготовки кадров в области газоснабжения «ГАЗ-ИНСТИТУТ»»

Защита состоится 11 марта 2024 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.01 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, пр-т Независимости, 65, корп. 2, ауд. 201, телефон ученого секретаря (017) 293-92-16, e-mail: pte@bntu.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан 9 февраля 2024 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций,
кандидат технических наук, доцент



А. А. Бобич

© Ключинский В. П., 2024

© Белорусский национальный
технический университет, 2024

ВВЕДЕНИЕ

Одной из приоритетных задач энергосбережения является эффективное и рациональное использование топливно-энергетических ресурсов. Повышение термодинамической эффективности генерации энергии различных видов необходимо рассматривать как один из возможных путей решения этой задачи.

Крупнейшим потребителем топливно-энергетических ресурсов в Республике Беларусь является промышленность, потребляющая более 8 миллионов тонн условного топлива в год, что составляет более 30 % конечного потребления топливно-энергетических ресурсов. При этом формируется более 10 тысяч тонн условного топлива топливно-энергетических отходов предприятий.

Сектор искусственного охлаждения (включая кондиционирование) потребляет около 17 % всей используемой в мире электроэнергии и неуклонно растет. В то же время большое количество предприятий в различных отраслях промышленности (химическая, пищевая, целлюлозно-бумажная, фармацевтическая, промышленность строительных материалов и др.) используют углекислоту в технологическом процессе. Как правило, необходимая углекислота либо закупается предприятиями у сторонних производителей, либо производится самостоятельно в специализированных, обособленных от основного технологического процесса установках.

В сложившихся обстоятельствах одним из возможных путей эффективной генерации энергии может служить совместное производство электрической, тепловой энергии, холода и углекислоты – полигенерация. А в качестве источника энергии для таких установок могут выступать топливно-энергетические отходы предприятий и другие вторичные энергетические ресурсы (ВЭР).

Для утилизации низкопотенциальных ВЭР, которые в больших количествах присутствуют на промышленных предприятиях, находят все более широкое применение турбоустановки (ТУ) на основе низкокипящих рабочих тел (НКРТ), в которых вместо воды используются рабочие тела с более низкой, чем у воды температурой кипения. Это обуславливает целый ряд их преимуществ: использование низкопотенциальной энергии, низкий уровень шума, простота конструкции турбины и, как следствие, простота автоматизации процесса и др.

Несмотря на перспективность полигенерации, как в рамках концепции энергосбережения, так и в рамках концепции повышения экологической безопасности, анализ отечественных и зарубежных источников литературы по теме работы свидетельствует о незавершенности исследований в данной области. Отсутствует термодинамический анализ и объективные количественные оценки энергетической и экономической эффективности

как схем полигенерации в целом, так и применяемых в них технических решений.

Таким образом, разработка схем полигенерации с применением турбин на НКРТ, повышение их эффективности, термодинамический и технико-экономический анализ схем полигенерации являются актуальными, содержащими научную новизну и практическую значимость задачами для повышения энергетической эффективности и экологической безопасности генерации электрической энергии, теплоты, холода и углекислоты.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами и темами

Работа выполнена в учреждении образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого» (ГГТУ им. П. О. Сухого) в соответствии с планом НИР кафедры «Промышленная теплоэнергетика и экология», по Государственной программе научных исследований: тема «Энергетические и ядерные процессы и технологии» – «Теплообмен при конденсации озонобезопасных хладагентов и их маслофреоновых смесей в конденсаторах тригенерационных, холодильных и теплонасосных установок» (договор №1405/2021 от 18.03.2021). Тема диссертации утверждена в соответствии с решением совета ГГТУ им. П. О. Сухого приказом от 20.12.2018 г. № 1345-с и соответствует приоритетным направлениям научной, научно-технической и инновационной деятельности Республики Беларусь на 2021–2025 годы (Указ Президента Республики Беларусь от 07.05.2020 № 156): энергетика, строительство, экология и рациональное природопользование.

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является разработка технологических схем и научного обеспечения проектирования высокоэффективных полигенерационных турбоустановок на основе низкокипящих рабочих тел.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе были решены следующие задачи:

1. Провести анализ и выявить перспективные направления повышения технического и термодинамического совершенства систем совместного производства электричества, теплоты, холода и углекислоты.

2. Синтезировать схемы полигенерационных турбоустановок на основе низкокипящих рабочих тел. Разработать математическую модель, алгоритм ее реализации и на их основе создать программное обеспечение для проведения эксергетического анализа и оптимизации схем полигенерации.

3. Исследовать методы повышения эффективности турбоустановок на водяном паре применительно к установкам на низкокипящих рабочих те-

лах и влияние теплофизических свойств низкокипящих рабочих тел на эффективность турбоустановок.

4. Адаптировать общепринятую методику расчета технико-экономических показателей эффективности применительно к полигенерационным установкам на основе низкокипящих рабочих тел. Провести технико-экономический анализ синтезированных схем полигенерации.

Объект исследования: полигенерационные турбоустановки на основе низкокипящих рабочих тел и их элементы.

Предмет исследования: схемы полигенерационных турбоустановок и применяемые в них рабочие тела.

Научная новизна

Синтезированы энергоэффективные схемы полигенерационных турбоустановок для мини-ТЭЦ с генерацией электрической энергии, теплоты, холода, углекислоты в жидком и газообразном состоянии, источником энергии которых могут выступать топлива с низкой теплотворной способностью, а внутреннее охлаждение конденсаторов агрегата для производства углекислоты и холода которых заменено внешним охлаждением, что *позволяет* повысить эффективность схем полигенерации и расширить область их применения.

Разработана универсальная математическая модель, *позволяющая* моделировать полигенерационные турбоустановки на уровне их тепловых схем с применением широкого спектра низкокипящих рабочих тел, и алгоритм ее реализации, на основании которых создана программа, *предназначенная* для энергетического и эксергетического анализа, а также параметрической оптимизации. Верификация программы проводилась по экспериментальным и практическим данным, относительная погрешность не превышала 3 %, что свидетельствует об адекватности получаемых программой результатов.

Установлена зависимость эффективности турбоустановок при термодинамически оптимальных давлениях низкокипящих рабочих тел от критического давления, удельной теплоты конденсации и начальной температуры рабочих тел, применение которой *позволяет* прогнозировать эффективность работы турбоустановок и *делает* предварительный отбор термодинамически эффективных низкокипящих рабочих тел для работы в турбоустановках на сверхкритических параметрах рабочего тела.

Адаптирована общепринятая методика расчета технико-экономических показателей эффективности путем введения в расчет формул, *позволяющих* определять прогнозную стоимость турбоустановок с промежуточным перегревом и сверхкритическими параметрами низкокипящего рабочего тела, а также стоимость установок для производства углекислоты и холода, которые входят в состав синтезированных схем полигенерации. На основании

разработанной методики *получены* результаты технико-экономического анализа высокоэффективных схем полигенерации и методов повышения их эффективности: совместное производство холода и углекислоты, оптимизация параметров низкокипящих рабочих тел турбоустановок, оптимизация схем полигенерации, что *обеспечивает* повышение эффективности производства электрической энергии, теплоты, холода и углекислоты.

Положения, выносимые на защиту

1. Принципиальные схемы полигенерационных турбоустановок на основе низкокипящих рабочих тел, источником энергии которых могут выступать топлива с низкой теплотворной способностью, а внутреннее охлаждение конденсаторов агрегата для производства углекислоты и холода которых заменено внешним охлаждением, что *позволяет* повысить эффективность схем полигенерации и расширить область их применения.

2. Математическая модель, алгоритм ее реализации и программа для расчета полигенерационных турбоустановок на основе низкокипящих рабочих тел, *отличающиеся* возможностью производить термодинамическую оптимизацию параметров рабочего тела в турбоустановках и эксергетический анализ полигенерационных турбоустановок в целом. Верификация программы проводилась по экспериментальным и практическим данным, относительная погрешность не превышала 3 %, что свидетельствует об адекватности получаемых программой результатов.

3. Результаты теоретических исследований влияния режимных параметров низкокипящих рабочих тел и их теплофизических свойств на эффективность турбоустановок, которые *показывают* целесообразность применения адаптированных для турбоустановок на основе низкокипящих рабочих тел методов повышения эффективности турбоустановок на водяном паре: повышение начальных параметров рабочего тела и использование промежуточного перегрева при термодинамически оптимальных параметрах рабочего тела, а также *позволили установить* зависимость, обобщающую результаты исследования, между критическим давлением, удельной теплотой конденсации, начальной температурой низкокипящих рабочих тел и эффективностью турбоустановок при термодинамически оптимальных давлениях рабочих тел.

4. Модифицированную методику расчета технико-экономических показателей эффективности, *позволяющую* определять стоимость полигенерационных турбоустановок на основе низкокипящих рабочих тел и *учитывающую* влияние сверхкритических термодинамически оптимальных параметров низкокипящего рабочего тела и промежуточного перегрева при термодинамически оптимальных параметрах рабочего тела на стоимость турбоустановок.

Личный вклад соискателя ученой степени

Основные и принципиальные результаты диссертации, положения, выносимые на защиту, получены автором лично или при его непосредственном участии. Личный вклад соискателя заключается в создании математической модели полигенерационных турбоустановок для проведения их энергетического анализа, алгоритма ее реализации, проведении теоретических, расчетных исследований, в создании программы, обобщении и анализе полученных результатов и закономерностей. Совместно с научным руководителем, д.т.н., профессором А. В. Овсянником и другими соавторами публикаций разработаны схемы полигенерационных турбоустановок на основе низкокипящих рабочих тел.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные положения диссертационной работы и отдельные ее разделы докладывались и обсуждались на 14 конференциях: 39 и 40 научных конференциях студентов I, II ступеней и аспирантов (г. Гомель, 2019, 2020); XII Международной научной конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых «Беларусь в современном мире» (г. Гомель, 2019); XIX и XX Международных научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления» (г. Гомель, 2019, 2020); Всеукраинской научно-технической конференции «Актуальные проблемы энергетики и экологии» (г. Одесса, 2020); III Международной конференции «Современные проблемы теплофизики и энергетики» (г. Москва, 2020); XIII Всеукраинской научно-технической конференции «Современные проблемы холодильной техники и технологии» (г. Одесса, 2021); научной конференции «Наука, техника и развитие инновационных технологий» (г. Ашхабад, 2021); XIV Международной научно-технической конференции «Современные проблемы машиноведения» (г. Гомель, 2022); XVI Минском международном форуме по тепло- и массообмену (г. Минск, 2022); международной научно-практической конференции «Современные технологии и экономика в энергетике» (г. Санкт-Петербург, 2023); межвузовском международном конгрессе «Высшая школа: научные исследования» (г. Москва, 2023); международной конференции «Научные исследования стран ШОС: синергия и интеграция» (г. Пекин, 2023).

Результаты диссертации использованы в НИР кафедры «Промышленная теплоэнергетика и экология» ГГТУ им. П. О. Сухого, по Государственной программе научных исследований: тема «Энергетические и ядерные процессы и технологии» – «Теплообмен при конденсации озонобезопасных хладагентов и их маслофреоновых смесей в конденсаторах тригенерационных, холодильных и теплонасосных установок» (договор № 1405/2021 от 18.03.2021); использованы на производственном унитарном предпри-

ятии «Белстеклопром»; внедрены в учебный процесс кафедры «ПТЭиЭ» в лекционные курсы: «Промышленные теплообменные процессы и установки», «Котельные установки промышленных предприятий», «Основы научных исследований и инновационной деятельности», нашли применение при проведении практических занятий. Полученные в диссертации результаты использованы при решении кейса на тему «Низкоуглеродное развитие электроэнергетики на основе экологически нейтральных технологий» и удостоены второго места в лиге молодых специалистов СНГ международного инженерного чемпионата «Case-in». Получен протокол о намерениях внедрения полигенерационных установок ООО «ТГЭ РУС». Получено свидетельство № 1497-КП о регистрации объекта авторского права (программы для ЭВМ) в национальном центре интеллектуальной собственности Республики Беларусь.

Опубликование результатов диссертации

По теме диссертации опубликовано 26 работ, в том числе 12 статей в рецензируемых изданиях (8 – в журналах, входящих в международную базу данных Scopus и перечень ВАК; 4 – в журналах из перечня ВАК), 2 статьи в тематических журналах и сборниках, 12 публикаций в тематических сборниках, трудах, материалах научных конференций. Общий объем материалов, опубликованных по теме диссертации, составляет 9,1 авторских печатных листа.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из перечня условных обозначений, введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, списка использованных источников, списка публикаций соискателя ученой степени и приложений. Общий объем диссертации составляет 225 страниц. Всего иллюстраций – 67 рисунка на 35 страницах; таблиц – 32 на 16 страницах. Список использованных источников в количестве 202 наименований на 20 страницах и 14 приложений на 82 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В первой главе диссертации выполнен обзор литературы по теме диссертации. Рассмотрены работы ряда авторов по созданию полигенерационных турбоустановок. Изучена актуальность создания таких установок, а также рассмотрены предложенные различными авторами (Кокорин О. Я., Клименко А. В., Агабабов В. С., *Marques A.* и др.) схемы полигенерации. Выявлено, что основные теоретические исследования проведены для схем с турбоустановками на водяном паре. Схемы с турбоустановками на основе НКРТ представлены в литературе не так широко. Предложенные различными авторами схемы полигенерации обладают рядом недостатков: огра-

ниченная область применения; как правило, производство лишь трех видов продукции (электрическая энергия, теплота, холод); недостаточная изученность схем (отсутствует анализ схем полигенерации с производством диоксида углерода) [10; 16].

Установлено, что применение турбоустановок на основе НКРТ целесообразно при утилизации низкопотенциальных источников энергии, при распределенной генерации энергии в небольших населенных пунктах, в составе маломощных ПГУ.

Рассмотрены предложенные различными авторами (Дологлонян А. В., Матвеев В. Т., *Chen W., Feng H.*) пути оптимизации турбоустановок на основе НКРТ: оптимизация разности между критической температурой рабочего тела и температурой насыщения в цикле, оптимизация площади поверхности теплопередачи испарителя и массового расхода рабочего тела, выбор оптимальной рабочей жидкости и др. Малоизученной областью остается возможность повышения эффективности турбоустановок на НКРТ за счет методов, применяемых для турбоустановок на водяном паре: повышение параметров рабочего тела и использование промежуточного перегрева.

Проведен обзор методик, развития, критериев выбора оптимального НКРТ. Большинство авторов сошлись на мнении, что абсолютно идеально рабочего тела (удовлетворяющего всем необходимым критериям) на данный момент не существует. Разработаны лишь общие критерии выбора рабочих тел.

Рассмотрены методы термодинамического анализа энергетических установок. Наиболее универсальным является эксергетический метод термодинамического анализа, позволяющий учитывать ценность различных видов энергии и определять степень термодинамического совершенства процессов, что немало важно при оценке эффективности схем полигенерации.

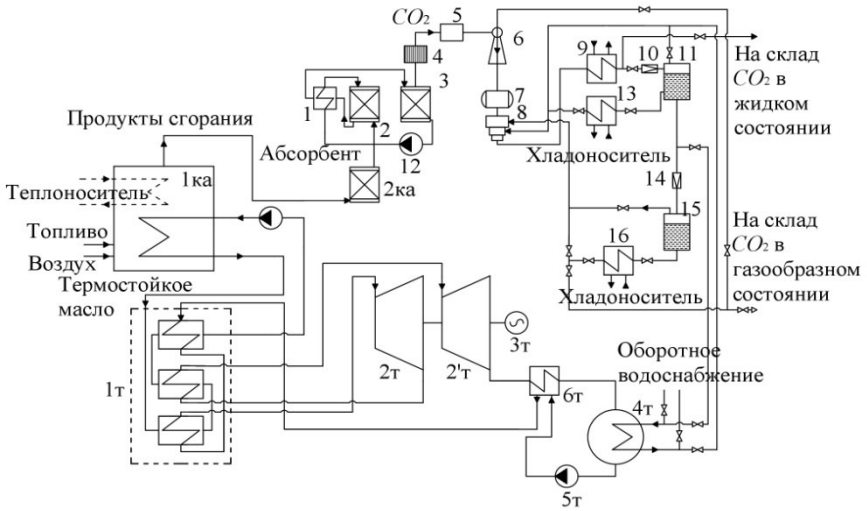
Таким образом, установлено, что существуют перспективные схемы полигенерации, которые требуют дальнейшего изучения, анализа их эффективности и путей оптимизации, создания математической модели и на ее основе программы для моделирования и эксергетической оптимизации схем полигенерации с применением различных низкокипящих рабочих тел.

Во второй главе диссертации на основании литературного обзора, из представленных в таблице 1 агрегатов, синтезированы схемы полигенерационных турбоустановок на основе низкокипящих рабочих тел (пример такой схемы представлен на рисунке 1), которые могут найти применение в металлургии, химической, целлюлозно-бумажной и др. отраслях промышленности [10].

Таблица 1 – Классификация агрегатов для синтеза схем полигенерации

Ресурсы					
природный газ		тепловые ВЭР		топлива с низкой теплотворной способностью	
Установка для преобразования энергетических ресурсов					
ГТУ		котел-утилизатор		котлоагрегат	
Установка для преобразования тепловой энергии					
с (ТО) для подогрева теплоносителя			без ТО для подогрева теплоносителя		
Установка с низкпотенциальным подводом теплоты для получения электрической энергии					
Турбоустановка (ТУ) на НКРТ					
на насыщенном паре		на перегретом паре		с промежуточным перегревом	
с ТО	без ТО	с ТО	без ТО	с ТО	без ТО
Установка для получения холода					
Парокомпрессионная холодильная установка (ХУ)					
с охлаждением ТУ			без охлаждения ТУ		
Установка для преобразования материальных потоков					
Установка по производству углекислоты и холода					
внутреннее охлаждение конденсатора ХУ			внешнее охлаждение конденсатора ХУ		
с охлаждением ТУ	без охлаждения ТУ		с охлаждением ТУ	без охлаждения ТУ	

Для синтезированных схем полигенерации разработана универсальная математическая модель (структура которой представлена на рисунке 2 с системой балансовых уравнений (1)) и алгоритм ее реализации, на основе которых создана программа [11; 15]. Программа позволяет проводить эксергетический анализ более ста различных вариантов схем. При этом программа допускает выбор различных низкокипящих рабочих тел, определяет эксергетически оптимальные параметры рабочего тела для различных схем ТУ при использовании различных НКРТ. Полученный результат представляет в виде графических схем, на которых изображены необходимые для эксергетического анализа параметры, а также выдает результат в виде текстового документа в зависимости от выбранного варианта схемы. Верификация программы проводилась по экспериментальным и практическим данным, в том числе полученным на мини-ТЭЦ в филиале «Речицкие электрические сети» РУП «Гомельэнерго». Относительная погрешность не превышала 3 %, что свидетельствует об адекватности получаемых программой результатов.



1ка – котлоагрегат; **2ка** – газоочистительная установка; **2м, 2'т** – ЧВД и ЧНД турбины; **1т, 6т, 1, 13, 16** – теплообменный аппарат; **3т** – генератор; **4т, 9** – конденсатор; **5т, 12** – насос; **2** – абсорбер; **3** – десорбер; **4** – брызгоотделитель; **5** – осушитель; **6** – инжектор; **7** – ресивер; **8** – компрессор; **10, 14** – регулирующий вентиль; **11, 15** – сепаратор
Рисунок 1 – Схема полигенерационной установки [1]

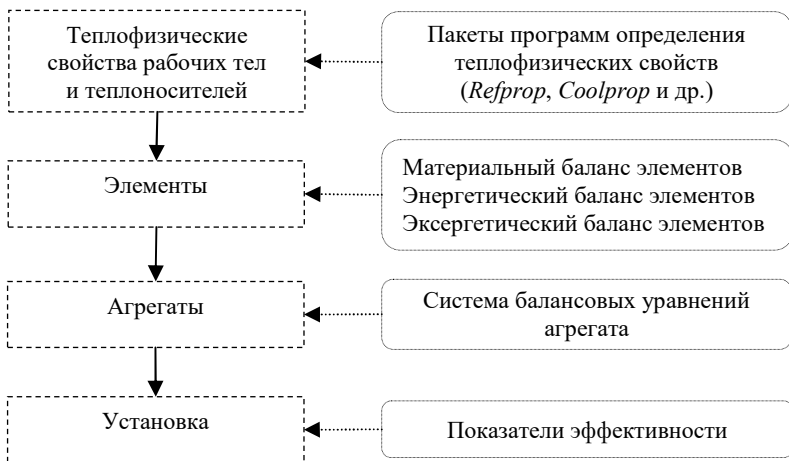


Рисунок 2 – Структура математической модели полигенерационной установки

Система балансовых уравнений агрегата полигенерационной установки:

$$\begin{cases} \sum M_{\text{вх}} \cdot A_{i,j} = \sum M_{\text{вых}} \cdot A_{i,j} \\ \sum U_{\text{вх}} \cdot A_{i,j} = \sum U_{\text{вых}} \cdot A_{i,j} + \sum \Delta U \cdot A_{i,j}, \\ \sum E_{\text{вх}} \cdot A_{i,j} = \sum E_{\text{вых}} \cdot A_{i,j} + \sum \Delta E \cdot A_{i,j} \end{cases} \quad (1)$$

где $A_{i,j}$ – элементы матрицы, характеризующие схему полигенерационной установки, единиц; $M_{\text{вх}}, M_{\text{вых}}$ – соответственно массовый расход материального носителя за единицу времени, поступающего в агрегат полигенерационной установки и покидающий его, кг/с; $U_{\text{вх}}, U_{\text{вых}}$ – энергия, поступающая в агрегат полигенерационной установки и покидающая его, Дж/с; ΔU – потери энергии в агрегате полигенерационной установки, Дж/с; $E_{\text{вх}}, E_{\text{вых}}$ – эксергия, поступающая в агрегат полигенерационной установки и покидающая его, Дж/с; ΔE – потери эксергии в агрегате полигенерационной установки, Дж/с.

В третьей главе диссертации представлены результаты численных исследований термодинамической эффективности турбоустановок на основе НКРТ. Исследования проводились для турбоустановок на перегретом низкипящем рабочем теле и турбоустановок с промежуточным перегревом рабочего тела.

В рамках исследования рассмотрено влияние параметров рабочего тела (температуры и давления) на эксергетическую эффективность турбоустановок и представлены зависимости эксергетического КПД турбоустановки от температуры и давления рабочего тела перед турбиной, а также влияние этих параметров на потери эксергии по элементам установки. Исследования проводились для двух характерных схем: турбоустановка с теплообменным аппаратом и без него. Полученные результаты показали, что для каждой из схем существуют свои эксергетически оптимальные параметры. А оптимизация параметров для турбоустановок на основе НКРТ отлична от оптимизации для установок на водяном паре (оптимальным не является давление, приводящее к наименьшим потерям эксергии в конденсаторе, как это принято для турбоустановок на водяном паре (рисунок 3)) [2; 5].

Выявлено, что при любой температуре низкокипящего рабочего тела можно определить давление, при котором эксергетический КПД исследуемых схем будет максимальным. Построены линии максимального эксергетического КПД (на примере $R236EA$) (рисунок 4), которые позволяют определять оптимальное давление низкокипящего рабочего тела

перед турбиной для различных температур, прогнозировать эксергетический КПД установки при изменении параметров рабочего тела [2].

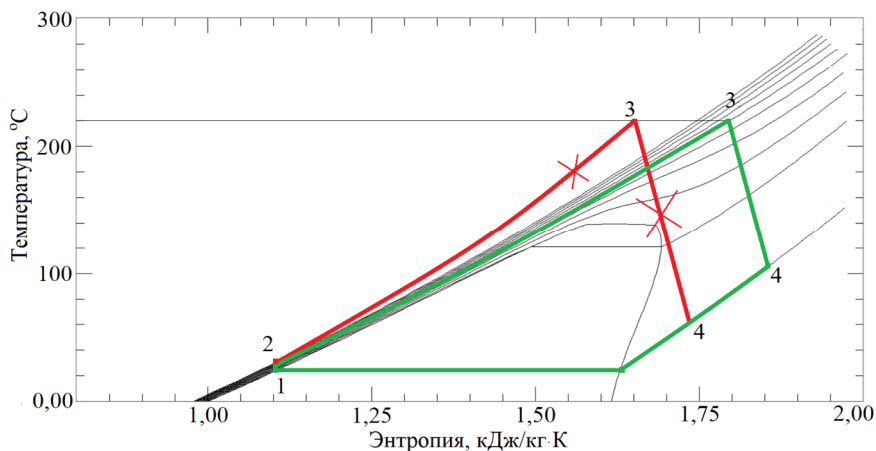


Рисунок 3 – Пример цикла турбоустановки без теплообменного аппарата в T - s координатах при оптимальном давлении НКРТ

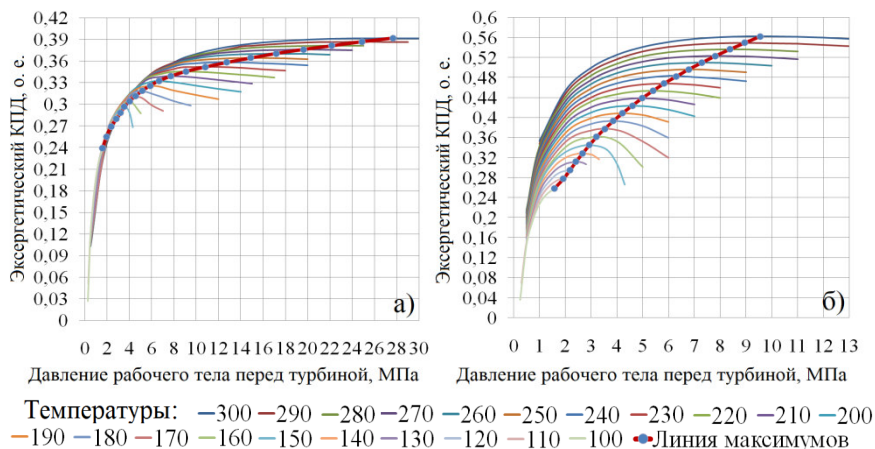


Рисунок 4 – Зависимость эксергетического КПД от давления при различных температурах рабочего тела для схемы без теплообменного аппарата (а) и для схемы с теплообменным аппаратом (б)

Аналогичные исследования производились и для схемы с промежуточным перегревом НКРТ (изучалось влияние параметров рабочего тела на выходе из промежуточного перегрева на эксергетическую эффективность турбоустановки). Установлено (рисунок 5), что для каждой зависимости

эксергетического КПД от давления существует значение, характеризующееся максимальным эксергетическим КПД, который может быть получен для данной температуры рабочего тела на выходе из промежуточного перегревателя [6].

Из рисунка 5 видно, что при малых давлениях перегрев рабочего тела в промежуточном перегревателе приводит к понижению эксергетического КПД.

Таким образом, существуют оптимальные параметры рабочего тела как перед турбиной (для схемы на перегретом паре), так и перед ЧВД и ЧНД турбины (для схемы с промежуточным перегревом), при которых достигается максимальная эксергетическая эффективность, а использование оптимальных параметров и промежуточного перегрева положительно сказывается на эксергетической эффективности турбоустановки в целом [2; 5; 6; 8].

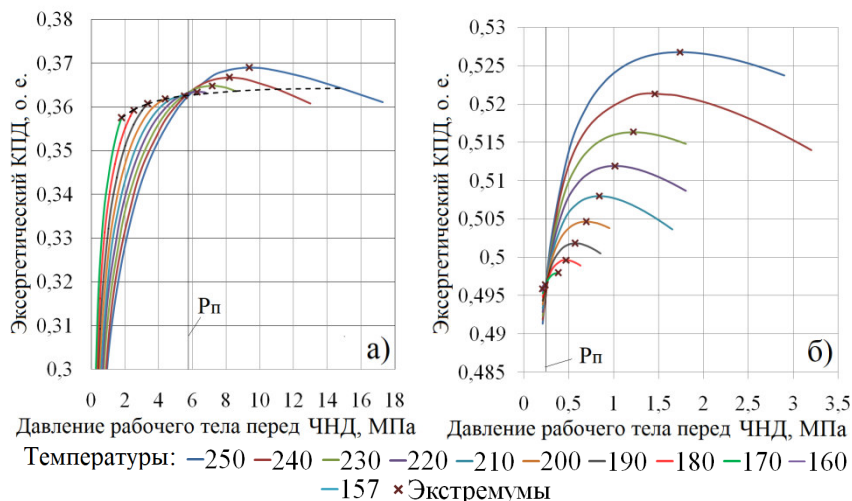


Рисунок 5 – Зависимости эксергетического КПД от давления при различных температурах промежуточного перегрева НКРТ для схемы без теплообменного аппарата (а) и для схемы с теплообменным аппаратом (б)

Следующим логичным этапом становится сравнение низкокипящих рабочих тел по их эксергетической эффективности при термодинамически оптимальных для каждого рабочего тела параметрах (рисунок б).

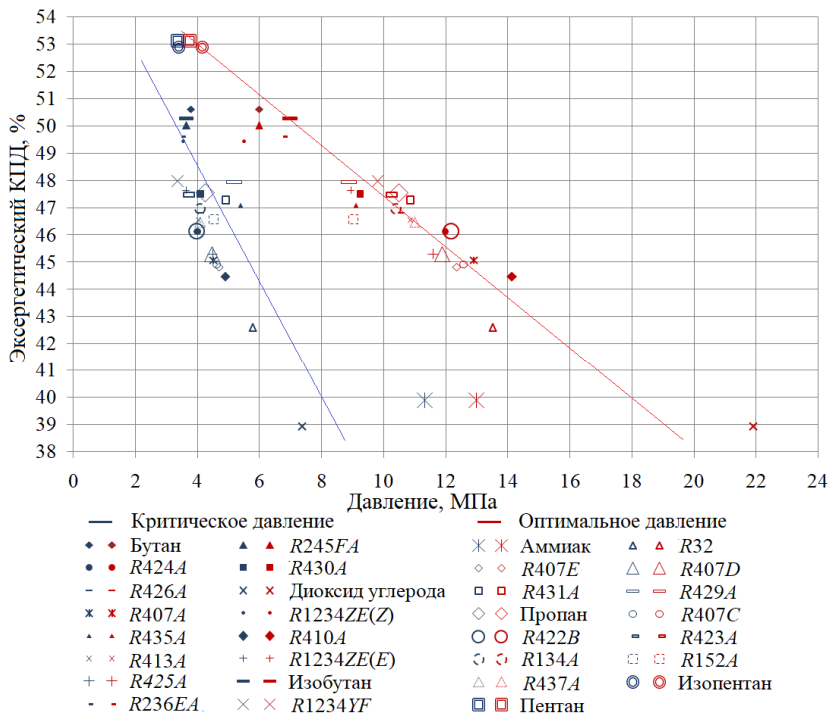


Рисунок 6 – Результаты исследований низкокипящих рабочих тел

В ходе исследования установлено, что для исследуемых рабочих тел последовательность расположения зависимостей эксергетического КПД от температуры при оптимальных, с термодинамической точки зрения, давлениях рабочих тел сохраняется во всем изучаемом диапазоне температур (от 100 до 300 °С). Иными словами, рабочее тело, доминирующее по эксергетическому КПД, является таковым при любой температуре в заданном диапазоне. Тогда сравнительный анализ рабочих тел по эксергетической эффективности можно осуществлять по произвольно выбранной температуре (250 °С) [1].

Таким образом, произведен расчет турбоустановки с теплообменным аппаратом для различных озонобезопасных низкокипящих рабочих тел при температуре 250 °С. Для удобства анализа полученные результаты приведены в виде диаграмм (рисунок 6 и 7).

Как видно из рисунка 6, наибольшим эксергетическим КПД обладает природный хладагент: пентан (53,1 %), изопентан (52,9 %), бутан (50,6 %), изобутан (50,3 %), они имеют низкий потенциал глобального потепления, но при этом пожаровзрывоопасны. Среди однокомпонентных хладагентов

наибольший эксергетический КПД имеют $R245FA$ (50,0 %), $R236EA$ (49,6 %), $R1234ZE(Z)$ (49,4 %), $R1234YF$ (48,0 %), $R1234ZE(E)$ (47,6 %), при этом $R245FA$, $R236EA$ имеют высокий потенциал глобального потепления (ПГП $R245FA$ = 1030, ПГП $R236EA$ = 1370) и регламентируются Монреальским протоколом, а $R1234ZE(Z)$, $R1234YF$, $R1234ZE(E)$ обладают высокой стоимостью. Среди многокомпонентных смесей гидрофторуглеродных хладагентов – $R429A$ (47,9 %), $R430A$ (47,5 %), $R423A$ (47,5 %), $R431A$ (47,3 %), $R435A$ (47,1 %). Из них $R430A$ и $R423A$ имеют высокий потенциал глобального потепления (ПГП $R430A$ = 120, ПГП $R423A$ = 2200), а $R429A$, $R431A$, $R435A$ имеют низкий ПГП и обладают хорошей эксергетической эффективностью, однако она более чем на 5 % ниже, по сравнению с наиболее эффективными НКРТ (пентан).

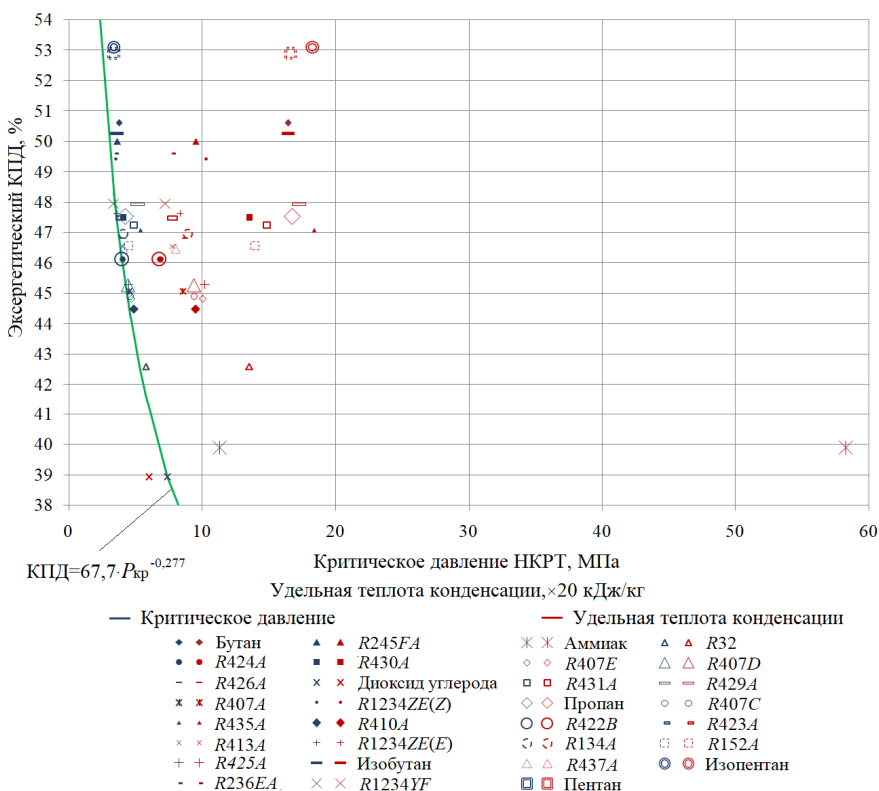


Рисунок 7 – Влияние теплофизических свойств рабочих тел на эффективность турбоустановки

Из полученных результатов (рисунки 6, 7) следует, что для всех исследуемых рабочих тел при данной температуре перед турбиной (250 °С) эксергетически оптимальные давления лежат в области сверхкритических значений [1]. Можно наблюдать следующую закономерность: большим эксергетическим КПД обладают рабочие тела с меньшим критическим и оптимальным (с термодинамической точки зрения) давлениями, с большей удельной теплотой конденсации.

В результате обобщения численного исследования получена зависимость эксергетического КПД турбоустановки от температуры НКРТ перед турбиной при термодинамически оптимальных значениях давления НКРТ:

$$\eta_e^{TY}(t, P_{кр}, L_k) = -17,5 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 + 228,6 \cdot 10^{-3} \cdot t + 47,5 \cdot P_{кр}^{-27,7 \cdot 10^{-2}} \cdot L_k^{7,2 \cdot 10^{-2}} - 46,0, \quad (2)$$

где t – температура рабочего тела перед турбиной, °С; $P_{кр}$ – давление рабочего тела в критической точке, МПа; L_k – удельная теплота конденсации рабочего тела в конденсаторе турбоустановки, кДж/кг.

Погрешность получаемых при помощи зависимости (2) результатов не превышала 10 % в диапазоне температур от 100 до 300 °С. Таким образом, полученная зависимость (2) позволяет определять эксергетический КПД турбоустановки в диапазоне температур НКРТ перед турбиной от 100 до 300 °С при термодинамически оптимальных (сверхкритических) значениях давления для различных низкокипящих рабочих тел, а также проводить предварительный отбор термодинамически эффективных низкокипящих рабочих тел для работы в турбоустановках на сверхкритических параметрах рабочего тела [8;14].

Аналогичным образом изучено влияние рабочего тела на прирост эксергетической эффективности от использования промежуточного перегрева (таблица 2). Полученные результаты показывают, что применение промежуточного перегрева в турбоустановках на НКРТ приводит к повышению их эксергетической эффективности. В среднем для исследуемых рабочих тел прирост эксергетического КПД составляет 4,7 %. При этом для некоторых рабочих тел (R717, R32) прирост эксергетического КПД значительно превосходит средние результаты и достигает 8,1 % и 6,6 % соответственно, что обусловлено их теплофизическими свойствами.

Из полученных результатов видно, что давление рабочего тела перед ЧВД турбины в схеме с промежуточным перегревом НКРТ во всех случаях выше, чем в схеме на перегретом паре.

В целом характерна следующая тенденция: большим приростом эффективности от использования промежуточного перегрева обладают малоэффективные рабочие тела (рабочие тела, обладающие низкой эффективностью в турбоустановках на перегретом паре).

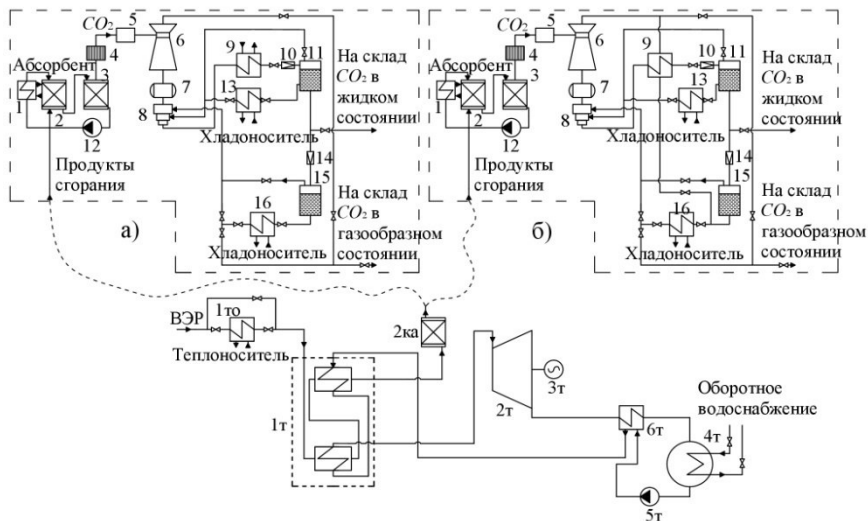
Таблица 2 – Влияния НКРТ на эффективность схем турбоустановок [9]

Название НКРТ	На перегретом паре			С промежуточным перегревом				$\Delta\eta, \%$	
	Параметры НКРТ перед турбиной		$\eta, \%$	Параметры НКРТ перед ЧВД турбины		Параметры НКРТ перед ЧНД турбины			$\eta, \%$
	$T, ^\circ\text{C}$	$P, \text{МПа}$		$T, ^\circ\text{C}$	$P, \text{МПа}$	$T, ^\circ\text{C}$	$P, \text{МПа}$		
<i>R125</i>	250	13,3	46,2	250	16,9	250	5,9	49,7	3,5
<i>R134A</i>	250	10,4	47,0	250	14,7	250	4,3	51,4	4,4
<i>R152A</i>	250	9,0	46,6	250	13,1	250	3,4	51,8	5,2
<i>R245FA</i>	250	6,0	50,0	250	8,2	250	1,9	53,7	3,7
<i>R32</i>	250	13,5	42,6	250	20,2	250	6,8	49,2	6,6
<i>R1234YF</i>	250	9,8	48,0	250	13,2	250	3,9	51,8	3,8
<i>R1234ZE(E)</i>	250	9,0	47,6	250	13,0	250	3,1	51,7	4,1
<i>R1234ZE(Z)</i>	250	5,5	49,4	250	7,7	250	1,9	53,8	4,4
<i>R1233ZD(E)</i>	250	4,9	49,9	250	6,6	250	1,6	54,0	4,1
<i>R407A</i>	250	12,9	45,1	250	18,3	250	6,0	49,6	4,5
<i>R410A</i>	250	14,1	44,7	250	18,7	250	6,6	49,7	5,0
<i>R744</i>	250	21,9	38,0	250	24,9	250	13,2	43,8	5,8
<i>R717</i>	250	13,0	39,9	250	19,5	250	5,3	48,0	8,1
<i>R290</i>	250	10,5	47,6	250	13,5	250	4,6	51,9	4,3
<i>R600A</i>	250	7,0	50,3	250	8,9	250	2,2	53,9	3,6

В четвертой главе диссертации проведен технико-экономический анализ синтезированных схем полигенерации. Адаптирована методика расчета технико-экономических показателей эффективности полигенерационных установок.

На первом этапе произведен эксергетический анализ холодильной части схем полигенерационных установок (выделенных на рисунке 8 пунктиром) и предназначенных как для производства углекислоты различного агрегатного состояния, так и для производства холода двух температурных уровней [3; 7]. Отличительной особенностью установок по производству холода и углекислоты является способ охлаждения конденсатора: охлаждение конденсатора жидкой углекислотой, вырабатываемой в самой установке (рисунок 8, б) и внешний источник охлаждения конденсатора, например, система оборотного водоснабжения с градирней либо холодная вода, поступающая на объект из поверхностных или подземных источников (рисунок 8, а).

С помощью разработанной программы произведен эксергетический анализ холодильной части схем полигенерационных установок (рисунок 8), результаты которого представлены в таблице 3.



1m, 1mo, 6m, 1, 13, 16 – теплообменный аппарат; *2m* – турбина; *3m* – генератор; *4m, 9* – конденсатор; *5m, 12* – насос; *2ka* – газоочистка; *2* – абсорбер; *3* – десорбер; *4* – брызгоотделитель; *5* – осушитель; *6* – инжектор; *7* – резистор; *8* – компрессор; *10, 14* – регулирующий вентиль; *11, 15* – сепаратор

Рисунок 8 – Схемы полигенерационных турбоустановок с внешним охлаждением конденсатора оборотной водой (*а*) и внутренним охлаждением конденсатора углекислотой (*б*)

Таблица 3 – Сравнительный анализ способов охлаждения конденсатора установки по производству холода и углекислоты [7]

Параметры	Внутреннее охлаждение конденсатора углекислотой	Внешнее охлаждение конденсатора оборотной водой
Эксергия электрической энергии, используемой на привод компрессора, %	100,0	3,0
Потери эксергии по элементам установки, %:		
компрессор	43,7	1,3
конденсатор	41,8	0,4
регулирующие вентили	13,5	0,3
другие элементы	менее 0,1	менее 0,1
Эксергия поступающей на склад углекислоты и получаемого в установке холода, %	1,0	1,0

Из таблицы 3 видно, что схема с внешним охлаждением конденсатора является наиболее предпочтительной, так как приводит к меньшим затратам эксергии на привод компрессора. Это связано с тем, что внешнее ох-

лаждение конденсатора приводит к снижению количества эксергии, циркулирующей в цикле по сравнению со схемой с собственным охлаждением конденсатора, где значительное количество эксергии, содержащейся в жидкой углекислоте после второй ступени дросселирования, расходуется на охлаждение конденсатора холодильной установки. В свою очередь, это приводит к снижению потерь эксергии по элементам установки и, как следствие, к значительному снижению затрат эксергии на привод компрессора (со 100,0 % до 3,0 %).

На основании разработанной математической модели и созданной на ее основе программы произведен эксергетический анализ синтезированных схем полигенерации. В качестве рабочих тел использованы углекислота (дешевое, перспективное с экологической точки зрения рабочее тело), изобутан (одно из недорогих и наиболее термодинамически эффективных рабочих тел), *R410A* (рабочее тело, получившее широкое распространение в холодильной технике) и вода, как альтернатива НКРТ. В таблице 4 представлены результаты расчета некоторых синтезированных схем полигенерации.

В таблице 4 использованы следующие сокращения: ТУ(CO_2) на ПП* – турбоустановка с субкритическими параметрами НКРТ на перегретом паре, где в скобках указано применяемое рабочее тело; ТУ(CO_2) на ПП – турбоустановка на перегретом паре (при термодинамически оптимальных параметрах); ТУ(CO_2) с ПрП – турбоустановка с промежуточным перегревом НКРТ; ПКХМ – парокompрессионная холодильная машина; УПХиУ – установка по производству холода и углекислоты; ХУ – холодильная установка; Б/О или С/О – соответственно без или с охлаждением конденсатора турбоустановки жидким НКРТ; Н_{ТУ} – насос ТУ (на водяном паре либо на НКРТ).

Полученные результаты показывают, что схемы полигенерации с субкритическими параметрами рабочего тела не отличаются высокой эффективностью. Особенно это характерно для схем, в которых в качестве рабочего тела используется углекислота. Из предложенных схем с субкритическими параметрами рабочего тела относительно хорошими показателями эффективности обладают схемы на водяном паре, а для схем с ГТУ рабочее тело оказывает менее существенное влияние на эффективность установки в целом.

Повышение параметров рабочего тела в схемах с турбоустановками на НКРТ до термодинамически оптимальных (сверхкритических при данных условиях) позволяет повысить эффективность полигенерации. При этом более эффективными (по сравнению со схемами на водяном паре) становятся схемы и с *R410A*. Значительного увеличения вырабатываемой электрической энергии от использования сверхкритических параметров рабочего тела можно добиться для схем, в которых рабочим телом служит диоксид углерода (таблица 4).

Таблица 4 – Результаты расчета схем полигенерации

Источник	Исследуемые схемы		Эксергия выработ-го и потребл-го электричества, %				
	ТУ	ХУ	ГТУ	ТУ	Н _{ГТУ}	ХУ	Σ
ГТУ	ТУ(CO ₂) на ПП*	УПХиУ Б/О	28,8	1,6	-0,3	-1,4	28,7
ГТУ	ТУ(CO ₂) на ПП*	ПКХМ(CO ₂) Б/О	28,8	1,6	-0,3	-1,8	28,3
ГТУ	ТУ(CO ₂) на ПП	УПХиУ Б/О	28,8	11,7	-4,1	-1,4	35,0
ГТУ	ТУ(CO ₂) на ПП	УПХиУ С/О	28,8	11,8	-2,9	-12,1	25,6
ГТУ	ТУ(CO ₂) с ПрП	УПХиУ Б/О	28,8	13,5	-4,9	-1,4	36,0
ГТУ	ТУ(CO ₂) с ПрП	УПХиУ С/О	28,8	14,0	-3,8	-11,5	27,5
ГТУ	ТУ(CO ₂) на ПП	ПКХМ(CO ₂) Б/О	28,8	11,7	-4,1	-1,8	34,6
ГТУ	ТУ(CO ₂) на ПП	ПКХМ(CO ₂) С/О	28,8	11,8	-2,9	-9,5	28,2
ГТУ	ТУ(CO ₂) с ПрП	ПКХМ(CO ₂) Б/О	28,8	13,5	-4,9	-1,8	35,6
ГТУ	ТУ(CO ₂) с ПрП	ПКХМ(CO ₂) С/О	28,8	14,0	-3,8	-9,1	29,9
ГТУ	ТУ(R410A)наПП*	УПХиУ Б/О	28,8	6,9	-0,6	-1,4	33,7
ГТУ	ТУ(R410A) с ПрП	УПХиУ Б/О	28,8	12,6	-2,8	-1,4	37,2
ГТУ	ТУ(R410A) с ПрП	УПХиУ С/О	28,8	13,5	-2,4	-11,2	28,7
ГТУ	ТУ (R410A) с ПрП	ПКХМ(R410A)Б/О	28,8	12,6	-2,8	-1,3	37,3
ГТУ	ТУ(R600A)наПП*	УПХиУ Б/О	28,8	9,6	-0,6	-1,4	36,4
ГТУ	ТУ(R600A) с ПрП	УПХиУ Б/О	28,8	12,2	-1,5	-1,4	38,1
ГТУ	ТУ(вода) на ПП	УПХиУ Б/О	28,8	8,6	-0,3	-1,4	35,7
ГТУ	ТУ(вода) на ПП	ПКХМ(R410A)Б/О	28,8	8,6	-0,3	-1,3	35,8
ГТУ	ТУ(вода) на ПП	ПКХМ(R600A)Б/О	28,8	8,6	-0,3	-1,3	35,8
ВЭР	ТУ(CO ₂) на ПП*	УПХиУ Б/О	–	5,8	-1,0	-2,3	2,5
ВЭР	ТУ(CO ₂) с ПрП	УПХиУ Б/О	–	47,9	-17,5	-2,2	28,2
ВЭР	ТУ(CO ₂) с ПрП	УПХиУ С/О	–	49,7	-13,6	-38,2	-2,1
ВЭР	ТУ(CO ₂) с ПрП	ПКХМ(CO ₂) Б/О	–	47,9	-17,5	-2,9	27,5
ВЭР	ТУ(CO ₂) с ПрП	ПКХМ(CO ₂) С/О	–	49,7	-13,6	-28,7	7,4
ВЭР	ТУ(R410A) с ПрП	УПХиУ Б/О	–	44,8	-10,0	-2,3	32,5
ВЭР	ТУ(R600A) с ПрП	УПХиУ Б/О	–	43,4	-5,4	-2,3	35,7
ВЭР	ТУ(вода) на ПП	УПХиУ Б/О	–	30,4	-1,2	-2,3	26,9
КА	ТУ(CO ₂) с ПрП	УПХиУ Б/О	–	27,3	-10,0	-1,4	15,9
КА	ТУ(R410A) с ПрП	УПХиУ Б/О	–	25,6	-5,7	-1,4	18,5
КА	ТУ(вода) на ПП	УПХиУ Б/О	–	17,4	-0,7	-1,4	15,3

Промежуточный перегрев также позволяет повысить эффективность схем полигенерации. В таком случае схемы, работающие на углекислоте, становятся более эффективными, чем схемы, работающие на водяном паре.

Охлаждение конденсатора турбоустановки жидкой углекислотой приводит к увеличению вырабатываемой электрической энергии в генераторе турбоустановки. Это связано со снижением параметров рабочего тела на выходе из турбины и, как следствие, с увеличением располагаемого теплоперепада. При этом увеличиваются и затраты эксергии на производство углекислоты, причем эти затраты превосходят поло-

жительный эффект. Однако это позволяет отказаться от внешнего контура охлаждения.

Для охлаждения конденсатора турбоустановки жидкой углекислотой более предпочтительны схемы с промежуточным перегревом НКРТ. Такие схемы обладают более высокой эксергетической эффективностью, которая достигается не только за счет увеличения выработки электроэнергии в турбоустановке, но и за счет снижения количества углекислоты, необходимой для охлаждения конденсатора турбоустановки.

Наименьшими затратами на охлаждение конденсатора турбоустановки углекислотой (фреоном) обладают схемы с ГТУ. Это обусловлено меньшим количеством рабочего тела, циркулирующего в цикле и, как следствие, меньшим количеством эксергии, затрачиваемой на его охлаждение.

Схемы полигенерации с производством диоксида углерода вырабатывают несколько меньше электрической энергии, чем схемы без его производства. Это связано с увеличением затрат эксергии на привод компрессора в полигенерационной установке, что обусловлено увеличением количества рабочего тела, сжимаемого в компрессоре. Однако увеличение затрат эксергии на привод компрессора незначительно, что связано с применением трехступенчатой схемы сжатия рабочего тела в компрессоре.

При помощи адаптированной методики расчета технико-экономических показателей полигенерационных установок определены экономически оптимальные параметры рабочего тела для турбоустановок на основе НКРТ (рисунок 9, а). Данная методика позволяет учитывать изменение стоимости турбоустановок при применении промежуточного перегрева и нестандартных (сверхкритических) параметров НКРТ (формула 3, 4).

Стоимость турбоустановки на перегретом паре [10;14]:

$$C_{\text{п}}^{\text{TU}} = (46,5 \cdot 10^{-5} \cdot \Delta t^{\text{TU}} + 139,5 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta p^{\text{TU}} + 1) \cdot C_{\text{баз}}^{\text{TU}}, \quad (3)$$

где Δt^{TU} – разница между действительным и базовым значениями температур НКРТ перед турбиной, °С; Δp^{TU} – разница между действительным и базовым значениями давления НКРТ перед турбиной, МПа; $C_{\text{баз}}^{\text{TU}}$ – стоимость базового варианта турбоустановки, руб.

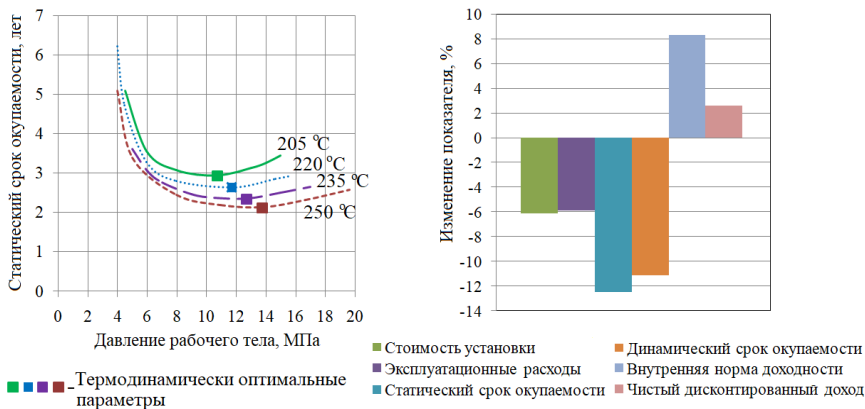


Рисунок 9 – Экономические показатели: а – турбоустановки при различных параметрах рабочего тела (R410A); б – при совмещении генерации холода и углекислоты в одной установке

Стоимость турбоустановки с промежуточным перегревом НКРТ [10; 14]:

$$C_{\Pi}^{\text{TY}} = (46,5 \cdot 10^{-5} \cdot \Delta t^{\text{TY}} + 139,5 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta p^{\text{TY}} + 1055,8 \cdot 10^{-3}) \cdot C_{\text{баз}}^{\text{TY}} \quad (4)$$

Анализ полученных результатов (рисунок 9, а) показывает, что повышение температуры НКРТ положительно сказывается и на термодинамической эффективности турбоустановок, и на экономической (снижается статический срок окупаемости (ССО)), несмотря на то, что увеличение температуры НКРТ перед турбиной приводит к удорожанию стоимости установки (формула 3). Из рисунка 9, а видно, что термодинамически оптимальное давление рабочего тела перед турбиной лежит в области давлений, при которых срок окупаемости установки наименьший. Таким образом, повышение давления рабочего тела до термодинамически оптимального, а также повышение температуры рабочего тела положительно сказывается на экономических показателях турбоустановки с теплообменным аппаратом.

На следующем этапе произведен анализ экономических показателей раздельной и совместной генерации холода и углекислоты (рисунок 9, б).

Из рисунка 9, б видно, что предложенная схема совместной генерации холода и углекислоты является более предпочтительной, так как

обладает меньшим сроком окупаемости (динамический срок окупаемости (ДСО) ниже на 11,1 %) и лучшей внутренней нормой доходности (ВНД выше на 8,3 %), а чистый дисконтированный доход (ЧДД) за 20 лет эксплуатации увеличивается на 2,6 %. Причиной этого служит более низкая стоимость установки (ниже на 6,1 %), меньшие эксплуатационные расходы (ниже на 5,9 %) и меньшие затраты электроэнергии (меньше на 6,7 %), чем при раздельной генерации холода и углекислоты [10].

На основании адаптированной методики получены экономические показатели схем полигенерации, источником энергии в которых служит котлоагрегат на древесной щепе. В качестве рабочих тел рассматривались углекислота, *R410A*, изобутан и вода. Результаты расчета представлены в таблице 5.

Из полученных результатов видно, что использование установки по производству холода и углекислоты (УПХиУ) является наиболее экономически выгодной для всех исследуемых схем и всех используемых рабочих тел. Экономические показатели полигенерационных установок с производством углекислоты лучше, нежели аналогичных установок без производства углекислоты [10].

Применение термодинамически оптимальных сверхкритических параметров рабочего тела, а также промежуточного перегрева положительно сказывается на экономических показателях полигенерационных турбоустановок. В некоторых случаях (для схем с УПХиУ) использование промежуточного перегрева не отражается на динамическом сроке окупаемости, а лишь незначительно увеличивает внутреннюю норму доходности. Объяснить это можно малым сроком окупаемости такого рода установок, что не позволяет в полной мере проявиться положительному эффекту от применения в полигенерации промежуточного перегрева. Однако даже при равных динамических сроках окупаемости полигенерационных установок чистый дисконтированный доход значительно (на 6,5–10 %) увеличивается при использовании промежуточного перегрева.

Применение наиболее термодинамически оптимального рабочего тела (изобутана) в схемах полигенерации может быть не всегда экономически оправдано, так как экономические показатели (статический и динамический сроки окупаемости, внутренняя норма доходности) схем полигенерации на *R410A* лучше, чем схем на *R600A* (изобутан). Объясняется это довольно малыми сроками окупаемости (до четырех лет) таких установок. Таким образом, увеличение стоимости турбоустановки на *R600A* (из-за ее большей мощности) не компенсируется

полученным экономическим эффектом от дополнительно выработанной электрической энергии за столь короткий период времени.

Таблица 5 – Экономические показатели схем полигенерации

Показатель	ПКХМ			УПХиУ		
	Субкр	Сверхкр	С ПрП	Субкр	Сверхкр	С ПрП
С турбоустановкой на углекислоте						
Экон. эффект, тыс. руб/год	411	3122	3527	2491	5202	5607
Σ Стоимость установки, руб	1455	6851	7703	2370	7765	8617
Экспл. расходы, тыс. руб/год	131	617	693	213	699	776
ССО, лет	∞	7,8	6,4	3,6	2,7	2,7
ДСО ($p = 10\%$), лет	∞	15,8	10,6	4,7	3,3	3,3
ВНД, %	–	11,4	14,7	27,3	37,0	37,1
ЧДД ($p = 10\%$), тыс. руб	–	643	2591	3185	16734	18682
С турбоустановкой на R410A						
Экон. эффект, тыс. руб/год	2588	3656	4061	4668	5735	6141
Σ Стоимость установки, руб	5247	5974	6638	6162	6888	7553
Экспл. расходы, тыс. руб/год	472	538	597	555	620	680
ССО, лет	10,7	4,0	3,6	2,5	2,0	2,0
ДСО ($p = 10\%$), лет	> 20	5,4	4,7	3,0	2,3	2,3
ВНД, %	6,9	24,7	27,5	40,3	50,7	50,8
ЧДД ($p = 10\%$), тыс. руб	–	6735	9015	15023	22826	25105
С турбоустановкой на изобутане						
Экон. эффект, тыс. руб/год	3656	4168	4467	5735	6247	6546
Σ Стоимость установки, руб	6986	7339	7873	7900	8253	8787
Экспл. расходы, тыс. руб/год	629	661	709	711	743	791
ССО, лет	5,0	3,9	3,7	2,3	2,1	2,1
ДСО ($p = 10\%$), лет	7,3	5,2	4,8	2,8	2,5	2,5
ВНД, %	19,5	25,4	26,9	43,0	47,0	47,1
ЧДД ($p = 10\%$), тыс. руб	4948	8686	10286	21039	24776	26377
С турбоустановкой на водяном паре						
Экон. эффект, тыс. руб/год	3378	–	–	5458	–	–
Σ Стоимость установки, руб	6322	–	–	7236	–	–
Экспл. расходы, тыс. руб/год	569	–	–	651	–	–
ССО, лет	5,3	–	–	2,3	–	–
ДСО ($p = 10\%$), лет	8,0	–	–	2,7	–	–
ВНД, %	18,1	–	–	43,9	–	–
ЧДД ($p = 10\%$), тыс. руб	3758	–	–	19849	–	–

Примечание – экономические показатели схем полигенерации представлены в цифрах на 21.07.2021 г., по курсу НБРБ (1 доллар = 2,5348 белорусских рубля).

Применение турбоустановок с субкритическими параметрами на углекислоте и R410A в полигенерационных установках экономически не оправдано. Сравнив схемы с субкритическими параметрами на НКРТ и на водяном паре видно, что применение НКРТ при температурах рабочего тела перед турбиной 250 °С не всегда экономически более целесообразно, чем применение водяного пара. Данный результат под-

тверждает выводы работ *J. Li, I. Vankeirsbilck* и Р. А. Садыкова, свидетельствующие, что при температурах рабочего тела перед турбиной 250–300 °С турбоустановка на НКРТ может конкурировать с установкой на водяном паре.

Схемы со сверхкритическими параметрами НКРТ более экономически эффективны, чем на водяном паре, исключение составляет сверхкритическая турбоустановка на углекислоте.

Предложенные схемы полигенерации со сверхкритическими параметрами и промежуточным перегревом (на примере полигенерационной установки с котлоагрегатом, работающем на древесной щепе) в сравнении с классическими полигенерационными турбоустановками на водяном паре позволяют на 21 % увеличить количество вырабатываемого электричества, уменьшить более чем на 4 тысячи тонн в год (более чем на 20 %) выбросы углекислоты в окружающую среду (используя абсорбируемую из продуктов сгорания углекислоту в технологических или коммерческих целях) и улучшить экономические показатели установок (внутренняя норма доходности увеличивается с 18,1 % до 50,8 %) [10].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Анализ литературных источников показал, что совместное производство электрической энергии, теплоты, холода и углекислоты является актуальным направлением исследований, малоизученной областью которых являются полигенерационные установки на основе низкокипящих рабочих тел. Установлена область применения турбоустановок, на основании чего *синтезированы* актуальные для энергетики Республики Беларусь принципиальные схемы полигенерационных турбоустановок на основе низкокипящих рабочих тел, источником энергии которых могут выступать топлива с низкой теплотворной способностью, а внутреннее охлаждение конденсаторов агрегата для производства углекислоты и холода которых заменено внешним охлаждением, что *позволяет* повысить эффективность схем полигенерации и расширить область их применения [3; 5; 7; 10–16; 20; 23; 26].

2. *Разработана* универсальная математическая модель полигенерационных турбоустановок и алгоритм ее реализации, на основе которых создана программа, *отличающиеся* возможностью эксергетического анализа схем полигенерации и термодинамической оптимизации параметров низкокипящих рабочих тел турбоустановок, входящих в состав схем полигенерации. Верификация программы проводилась по экспе-

риментальным и практическим данным, относительная погрешность не превышала 3 %, что свидетельствует об адекватности получаемых программой результатов [2–4; 6; 10; 17; 18].

3. Исследованы методы повышения эффективности турбоустановок на водяном паре применительно к установкам на низкокипящих рабочих телах. *Установлено*, что термодинамически оптимальные начальные параметры низкокипящего рабочего тела необходимо определять исходя из критерия минимизации потерь эксергии во всех элементах турбоустановки, а не из минимизации потерь в конденсаторе турбоустановки, независимо от наклона линии насыщенного пара рабочего тела в T - s координатах. При температурах рабочего тела 250 °С и выше (что характерно для турбоустановок на отходящих газах промышленных предприятий, утилизации выхлопных газов ГТУ и при сжигании низкопотенциальных топлив в котлоагрегатах) эксергетически оптимальное давление лежит в области сверхкритических значений для всех исследуемых низкокипящих рабочих тел. Применение промежуточного перегрева приводит к увеличению эффективности турбоустановок в среднем на 4,7 % и значительно зависит от теплофизических свойств рабочего тела, так для R600A прирост эксергетической эффективности составляет 3,6 %, а для R717 – достигает 8,1 %. Для малоэффективных рабочих тел применение схем с промежуточным перегревом наиболее предпочтительно (достигается наибольший прирост в эффективности). На основе полученных результатов *установлена* обобщающая зависимость между критическим давлением, удельной теплотой конденсации, начальной температурой низкокипящих рабочих тел и эффективностью турбоустановок при термодинамически оптимальных давлениях рабочих тел. Применение полученной зависимости *позволяет* прогнозировать эффективность работы турбоустановок в диапазоне начальных температур рабочего тела от 100 до 300 °С и делать предварительный отбор термодинамически эффективных низкокипящих рабочих тел для работы в турбоустановках на сверхкритических параметрах рабочего тела [1; 2; 5; 6; 8; 9; 12; 14; 19; 21; 24; 25].

4. *Адаптирована* общепринятая методика расчета технико-экономических показателей эффективности для полигенерационных турбоустановок на основе низкокипящих рабочих тел, *учитывающая* изменение стоимости турбоустановок при применении сверхкритических термодинамически оптимальных параметров низкокипящего рабочего тела и промежуточного перегрева при термодинамически оптимальных параметрах рабочего тела, а также *позволяющая* определять прогнозную стоимость установок для производства углекислоты и холода, которые входят в состав синтезированных схем полигенерации.

На основании предложенной методики *получены* результаты технико-экономического анализа схем полигенерации с различными источниками энергии, схемами и рабочими телами турбоустановок, способами охлаждения конденсаторов полигенерационных установок. *Установлено*, что предложенные схемы высокоэффективных полигенерационных турбоустановок (на примере полигенерационной установки, использующей в качестве топлива древесную щепу) в сравнении с классическими полигенерационными установками на водяном паре *позволяют* на 21 % увеличить количество вырабатываемой в установке электрической энергии; уменьшить более чем на 20 % выбросы углекислоты в окружающую среду; улучшить экономические показатели установок (внутренняя норма доходности увеличивается с 18,1 % до 50,8 %) [10–14; 22; 25; 26].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Результаты теоретических исследований, предложенные методы повышения энергетической эффективности турбоустановок, полученные закономерности, принципиальные схемы полигенерационных турбоустановок на основе низкокипящих рабочих тел, их эксергетический анализ, созданная программа, адаптированная методика расчета технико-экономических показателей эффективности могут быть использованы в качестве научной основы при проектировании высокоэффективных полигенерационных турбоустановок для совместного производства электрической энергии, теплоты, холода, углекислоты в жидком и газообразном состоянии.

Результаты диссертационной работы используются:

– в НИР кафедры «Промышленная теплоэнергетика и экология» ГГТУ им. П. О. Сухого, по Государственной программе научных исследований: тема «Энергетические и ядерные процессы и технологии» – «Теплообмен при конденсации озонобезопасных хладагентов и их маслофреоновых смесей в конденсаторах тригенерационных, холодильных и теплонасосных установок» (договор № 1405/2021 от 18.03.2021);

– на производственном унитарном предприятии «Белстеклопром» (акт внедрения);

– внедрены в учебный процесс кафедры «ПТЭиЭ» в лекционные курсы: «Промышленные теплообменные процессы и установки», «Котельные установки промышленных предприятий», «Основы научных исследований и инновационной деятельности» (акт внедрения).

Полученные в диссертации результаты использованы при решении кейса на тему «Низкоуглеродное развитие электроэнергетики на основе экологически нейтральных технологий» и удостоены второго места в лиге молодых специалистов СНГ международного инженерного чемпионата «Case-in» (диплом).

Получен протокол о намерениях внедрения полигенерационных установок ООО «ТГЭ РУС» (протокол о намерениях).

На основании результатов диссертационного исследования получено свидетельство № 1497-КП о регистрации объекта авторского права (программы для ЭВМ) в национальном центре интеллектуальной собственности Республики Беларусь (свидетельство о добровольной регистрации и депонировании объекта авторского права № 1497-КП).

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

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

1. Овсянник А. В. Термодинамический анализ озонобезопасных низкокипящих рабочих тел для турбодетандерных установок / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2020. – № 6 (63). – С. 554–562.

2. Ovsyannik, A. V. Thermodynamic analysis and optimization of low-boiling fluid parameters in a turboexpander / A. V. Ovsyannik, V. P. Kliuchinski // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1683. – № 042005.

3. Ovsyannik, A. V. Trigenation units on carbon dioxide with two-time overheating with installation of turbo detainer and recovery boiler / A. V. Ovsyannik, P. A. Kovalchuk, A. I. Arshukov, V. P. Kliuchinski // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1683. – № 042010.

4. Овсянник, А. В. Разработка компьютерной программы для оптимизации параметров низкокипящего рабочего тела в турбодетандерной установке / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2020. – № 3/4. – С. 108–115.

5. Овсянник А. В. Турбодетандерные установки на низкокипящих рабочих телах / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // Энергетика. Из-

вестия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2021. – № 1 (64). – С. 65–77.

6. Овсянник А. В. Термодинамический анализ и оптимизация параметров вторичного перегрева в турбодетандерных установках на низкикопящих рабочих телах / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2021. – № 2 (64). – С. 164–177.

7. Овсянник, А. В. Термодинамическая оптимизация установки для производства углекислоты как элемента тригенерационной турбоустановки на органическом цикле Ренкина / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2021. – № 1. – С. 61–68.

8. Овсянник, А. В. Влияние теплофизических свойств хладагентов на термодинамическую эффективность органического цикла Ренкина / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2021. – № 4. – С. 100–105.

9. Овсянник А. В. Выбор, расчет и термодинамический анализ турбоустановок на органическом цикле Ренкина / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2022. – № 1 (65). – С. 76–88.

10. Ключинский, В. П. Термодинамический и технико-экономический анализ тригенерационных установок на органическом цикле Ренкина / В. П. Ключинский, А. В. Овсянник // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2022. – № 1. – С. 80–89.

11. Овсянник А. В. Тригенерационные турбоустановки на основе низкикопящих рабочих тел./ А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2022. – № 3 (65). – С. 263–275.

12. Овсянник А. В. Технико-экономический анализ полигенерационных турбоустановок на основе диоксида углерода / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2023. – № 4 (66). – С. 387–400.

Статьи в тематических журналах и сборниках

13. Овсянник, А. В. Тригенерационная и полигенерационная утилизация вторичных энергетических ресурсов / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // Высшая школа: научные исследования: сборник научных статей в 2 ч. – Москва : Издательство Инфинити, 2023. – Ч. 2. – С. 108–115.

14. Ovsyannik, A. V. Calculation of technical and economic indicators of turbine units at ORC with low-boiling working fluids at supercritical para-

meters / A. V. Ovsyannik, V. P. Kliuchinski // Scientific research of the SCO countries: synergy and integration. – Beijing : Scientific publishing house Infinity, 2023. – С. 149–156.

Материалы конференций, семинаров и тезисы докладов

15. Ключинский, В. П. Перегрев паров хладагента в камере сгорания ГТУ парогазовой установки / В. П. Ключинский // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления: материалы XIX Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 25–26 апр. 2019 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2019. – С. 188–190.

16. Ключинский, В. П. Тригенерационные турбодетандерные установки на основе низкокипящих рабочих тел / В. П. Ключинский // Беларусь в современном мире: материалы XII Междунар. науч. конф. студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 16–17 мая 2019 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого, Гомел. обл. орг. о-ва «Знание»; под общ. ред. В. В. Кириенко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2019. – С. 329–331.

17. Овсянник, А. В. Моделирование и эксергетический анализ тригенерационных турбодетандерных установок / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // Актуальные проблемы энергетики и экологии: материалы международной конференции, Одесса, 29–30 сентября 2020 г. / М-во образования и науки Украины, Одесская национальная академия пищевых технологий; под общ. ред. О. С. Титлова. – Одесса, 2020. – С. 128–131.

18. Ключинский, В. П. Разработка компьютерной программы для оптимизации параметров низкокипящего рабочего тела в турбодетандерной установке / В. П. Ключинский // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления: материалы XX Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 23–24 апр. 2020 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2020. – С. 130–132.

19. Овсянник, А. В. Термодинамический анализ и оптимизация параметров низкокипящего рабочего тела в турбодетандерной установке / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // СПТЭ-2020: материалы III Международной конференция «Современные проблемы теплофизики и энергетики», Москва, 19–23 октября 2020 г. / Национальный исследо-

вательский университет МЭИ; редкол.: А. И. Леонтьев [и др.]. – Москва, 2020. – С. 620–621.

20. Овсянник, А. В. Тригенерация энергии в турбодетандерных установках на диоксиде углерода с двукратным перегревом / А. В. Овсянник, А. И. Аршуков, П. А. Ковальчук, В. П. Ключинский // СПТЭ-2020: материалы III Международной конференции «Современные проблемы теплофизики и энергетики», Москва, 19–23 октября 2020 г. / Национальный исследовательский университет МЭИ; редкол.: А. И. Леонтьев [и др.]. – Москва, 2020. – С. 621–623.

21. Ключинский, В. П. Повышение эффективности тригенерационных установок на органическом цикле Ренкина / В. П. Ключинский, А. В. Овсянник // Материалы научной конференции «Наука, техника и развитие инновационных технологий», посвященной 30-летию юбилею независимости Туркменистана, Ашхабад, 12–13 июня 2021 г. / Министерство образования Туркменистана, Академия наук Туркменистана. – Ашхабад : Академия наук Туркменистана, 2021. – С. 122–124.

22. Овсянник, А. В. Экономическое обоснование использования сверхкритических параметров рабочего тела в тригенерационных установках на ОЦР / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // Сборник тезисов докладов XIII Всеукраинской научно-технической конференции «Современные проблемы холодильной техники и технологии», Одесса, 23 – 25 сентября 2021 г. / М-во образования и науки Украины, Одесский национальный технологический университет, Учебно-научный институт холода, криотехнологий, экоэнергетики им. В. С. Мартыновского ОНТУ. – Одесса, 2021. – С. 29–32.

23. Овсянник, А. В. Тригенерационные установки на диоксиде углерода с двукратным перегревом с установкой турбодетандера и котла-утилизатора / А. В. Овсянник, А. И. Аршуков, П. А. Ковальчук, В. П. Ключинский // XVI Минский международный форум по тепло- и массообмену : тезисы докладов и сообщений, 16–19 мая 2022 года. – Минск : Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, 2022. – С. 1053–1057.

24. Овсянник, А. В. Турбодетандерные установки на низкокипящих рабочих телах / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // XVI Минский международный форум по тепло- и массообмену : тезисы докладов и сообщений, 16–19 мая 2022 года. – Минск : Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, 2022. – С. 1057–1061.

25. Овсянник, А. В. Техничко-экономический анализ полигенерационных турбоустановок на диоксиде углерода / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский, Н. В. Овсянник // Современные проблемы машино-

ведения: сборник научных трудов: в 2 ч. / Министерство образования Республики Беларусь, Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого, ПАО «ОАК» ОКБ Сухого, Таизский университет (Йеменская Республика); под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2023. – Ч. 2. – С. 78–82.

26. Овсянник, А. В. Экономические аспекты когенерационной, тригенерационной и полигенерационной утилизации вторичных энергетических ресурсов / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // Современные технологии и экономика в энергетике: материалы Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 27 апр. 2023 г. / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Казанский государственный энергетический университет, Белорусский национальный технический университет, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. – СПб. : Политех-пресс, 2023. – С. 149–151.



РЭЗІЮМЭ

Ключынскі Уладзіслаў Пятровіч

МАДЭЛЯВАННЕ І АПТЫМІЗАЦЫЯ ПОЛІГЕНЕРАЦЫЙНЫХ ТУРБАЎСТАНОВАК НА АСНОВЕ НІЗКАКІПЯЧЫХ ПРАЦОЎНЫХ ЦЕЛ

Ключавыя словы: полігенерацыя, эсергетычны аналіз, нізкакіпячае працоўнае цела, тэрмадынамічная эфектыўнасць, турбаўстанова, павышэнне эфектыўнасці, вытворчасць вуглекіслаты.

Мэта працы: распрацоўка тэхналагічных схем і навуковага забеспячэння практавання высокаэфектыўных полігенерацыйных турбаўстановак на аснове нізкакіпячых працоўных цел.

Метад даследавання. Праца заснавана на тэарэтычных даследаваннях з выкарыстаннем распрацаванай праграмы для мадэлявання і эсергетычнага аналізу схем полігенерацыйных турбаўстановак.

Атрыманя вынікі і іх навізна. Сінтэзаваны схемы полігенерацыйных турбаўстановак на аснове нізкакіпячых працоўных цел, якія дазваляюць павысіць эфектыўнасць полігенерацыі і пашырыць во-бласць яе прымянення. Распрацавана матэматычная мадэль полігенерацыйных турбаўстановак і алгарытм яе рэалізацыі, на аснове якіх створана праграма, якія адрозніваюцца магчымасцю эсергетычнага аналізу і тэрмадынамічнай аптымізацыі схем полігенерацыі. Устаноўлены заканамернасці паміж крытычным ціскам, удзельнай цеплынёй кандэнсацыі працоўных целаў і эфектыўнасцю турбаўстановак пры тэрмадынамічна аптымальных параметрах нізкакіпячага працоўнага цела. Распрацавана методка разліку эканамічных паказчыкаў эфектыўнасці полігенерацыйных турбаўстановак, на падставе якой, атрыманы вынікі тэхніка-эканамічнага аналізу схем полігенерацыі.

Рэкамендацыі па выкарыстанні: атрыманыя вынікі могуць быць выкарыстаны пры практаванні полігенерацыйных турбаўстановак на аснове нізкакіпячых працоўных цел. Вынікі дысертацыйнай працы выкарыстаныя ў НДП кафедры «Прамысловая цеплаэнергетыка і экалогія» УА ГДТУ ім. П. В. Сухога; выкарыстаны на вытворчым унітарным прадпрыемстве "Белшклапрам"; укаранёныя ў лекцыйныя курсы УА ГДТУ ім. П. В. Сухога. Атрыманы пратакол аб намерах ўкаранення полігенерацыйных устаноў ТАА "ТГЭ РУС". Атрымана пасведчанне № 1497-КП аб рэгістрацыі аб'екта аўтарскага права (праграмы для ЭВМ) у нацыянальным цэнтры інтэлектуальнай уласнасці Рэспублікі Беларусь.

Галіна выкарыстання: цэлюлозна-папяровая, харчовая, хімічная, фармацэўтычная, горназдабыўная прамысловасць, металургія, прамысловасць будаўнічых матэрыялаў.

РЕЗЮМЕ

Ключинский Владислав Петрович МОДЕЛЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПОЛИГЕНЕРАЦИОННЫХ ТУРБОУСТАНОВОК НА ОСНОВЕ НИЗКОКИПАЩИХ РАБОЧИХ ТЕЛ

Ключевые слова: полигенерация, эксергетический анализ, низкокипящее рабочее тело, термодинамическая эффективность, турбоустановка, повышение эффективности, производство углекислоты.

Цель работы: разработка технологических схем и научного обеспечения проектирования высокоэффективных полигенерационных турбоустановок на основе низкокипящих рабочих тел.

Методы исследования. Работа основана на теоретических исследованиях с использованием разработанной программы для моделирования и эксергетического анализа схем полигенерационных турбоустановок.

Полученные результаты и их новизна. Синтезированы схемы полигенерационных турбоустановок на основе низкокипящих рабочих тел, которые позволяют повысить эффективность полигенерации и расширить область ее применения. Разработана математическая модель полигенерационных турбоустановок и алгоритм ее реализации, на основе которых создана программа, отличающаяся возможностью эксергетического анализа и термодинамической оптимизации схем полигенерации. Установлены закономерности между критическим давлением, удельной теплотой конденсации рабочих тел и эффективностью турбоустановки при термодинамически оптимальных параметрах низкокипящего рабочего тела. Разработана методика расчета экономических показателей эффективности полигенерационных турбоустановок, на основании которой получены результаты технико-экономического анализа схем полигенерации.

Рекомендации по использованию: полученные результаты могут быть использованы при проектировании полигенерационных турбоустановок на основе низкокипящих рабочих тел. Результаты диссертационной работы использованы в НИР кафедры «Промышленная теплоэнергетика и экология» УО ГГТУ им. П. О. Сухого; использованы на производственном унитарном предприятии «Белстеклопром»; внедрены в лекционные курсы УО ГГТУ им. П. О. Сухого. Получен протокол о намерениях внедрения полигенерационных установок ООО «ТГЭ РУС». Получено свидетельство № 1497-КП о регистрации объекта авторского права (программы для ЭВМ) в национальном центре интеллектуальной собственности Республики Беларусь.

Область применения: целлюлозно-бумажная, пищевая, химическая, фармацевтическая, горнодобывающая промышленность, металлургия, промышленность строительных материалов.

SUMMARY

Kliuchynski Uladzislau Petrovich

MODELING AND OPTIMIZATION OF POLYGENERATION TURBINE PLANTS BASED ON LOW-BOILING WORKING FLUIDS

Keywords: polygeneration, exergy analysis, low-boiling working fluid, thermodynamic efficiency, turbine plant, efficiency improvement, production of carbon dioxide.

Objective: development of technological schemes and scientific support for the design of highly efficient polygeneration turbine plants based on low-boiling working fluids.

Research methods. The work is based on theoretical studies using the developed program for modeling and exergetic analysis of schemes of polygeneration turbine plants.

Obtained results and their novelty. Schemes of polygeneration turbine plants based on low-boiling working fluids have been synthesized, which make it possible to increase the efficiency of polygeneration and expand the scope of its application. A mathematical model of polygeneration turbine plants and an algorithm for its implementation have been developed, on the basis of which a program has been created that is distinguished by the possibility of exergetic analysis and thermodynamic optimization of polygeneration schemes. Regularities are established between the critical pressure, the specific heat of condensation of the working fluids and the efficiency of the turbine plant at thermodynamically optimal parameters of the low-boiling working fluid. A methodology has been developed for calculating the economic indicators of the efficiency of polygeneration turbine plants, on the basis of which the results of a technical and economic analysis of polygeneration schemes have been obtained.

Recommendation for use: the results obtained can be used in the design of polygeneration turbine plants based on low-boiling working fluids. The results of the dissertation work were used in the research developments of the Department “Industrial Heat Power Engineering and Ecology” of the Sukhoi State Technical University; used at the production unitary enterprise “Belsteklo-prom“; introduced into the lecture courses of the P. O. Sukhoi State Technical University. A protocol of intentions for the introduction of polygeneration plants of LLC “TGE RUS” has been received. Certificate No. 1497-KP on registration of the copyright object (computer program) at the National Center of Intellectual Property of the Republic of Belarus was obtained.

Application field: pulp and paper, food, chemical, pharmaceutical, mining, metallurgy, building materials industry.

Научное издание

КЛЮЧИНСКИЙ
Владислав Петрович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ
ПОЛИГЕНЕРАЦИОННЫХ ТУРБОУСТАНОВОК
НА ОСНОВЕ НИЗКОКИПАЮЩИХ РАБОЧИХ ТЕЛ**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.14.04 – промышленная теплоэнергетика

Подписано в печать 05.02.2024. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Цифровая печать.
Усл. печ. л. 2,10. Уч.-изд. л. 1,97. Тираж 80. Заказ 75.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск.