

На правах рукописи



ДОБРЫДНЕВ Денис Владимирович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЦИКЛОВ ПАРОТУРБИННЫХ
УСТАНОВОК ЭНЕРГОКОМПЛЕКСОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ
ПУТЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ КОНДЕНСАЦИИ ПАРА НА ЕГО
АБСОРБЦИЮ**

Специальность: 2.4.5 – Энергетические системы и комплексы
(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новочеркасск 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова».

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент, **Папин Владимир Владимирович**

Официальные оппоненты:

Дмитренко Артур Владимирович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта», заведующий кафедрой «Теплоэнергетика транспорта»;

Угланов Дмитрий Александрович, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», профессор кафедры «Теплотехника и тепловые двигатели».

Ведущая организация:

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

Защита состоится «20» июня 2025 г. в 15:45 часов на заседании диссертационного совета 24.2.303.01 при ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, корпус «Б», аудитория 237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Ивановского государственного энергетического университета.

Текст диссертации размещен

http://ispu.ru/sites/default/files/2025-03/Disser_Dobrydnev_D.V..pdf

Автореферат диссертации размещен на сайте ИГЭУ www.ispu.ru

Автореферат разослан «__» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.303.01



Бушуев
Евгений Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Эффективное использование имеющихся энергетических ресурсов относится к важнейшим принципам государственного правового регулирования в сфере энергосбережения. Одним из наиболее оптимальных технических решений в части повышения энергетической эффективности различных энергетических и технологических систем является утилизация сбросной теплоты технологических и энергетических установок с целью выработки электрической энергии. В ведущих промышленных странах полезное использование сбросной теплоты давно вошло в перечень обязательных задач по энергосбережению, а также снижению энергоемкости производства и себестоимости продукции. Достаточно часто, при этом, перед предприятиями стоит задача по обеспечению максимальной выработки электроэнергии при ограниченной тепловой мощности источника теплоты (например, технологической установки).

В данном направлении широкое распространение получил цикл Ренкина, в котором в зависимости от температурного потенциала источника теплоты в качестве термодинамического агента могут использоваться вода или органические рабочие тела. В связи с возросшим спросом на собственную генерацию среди малых и средних предприятий актуальной задачей является поиск оптимальных технологических решений цикла Ренкина паротурбинных установок малой мощности, работающих в условиях утилизации сбросной теплоты среднего и низкого потенциала. Повышение эффективности может быть обеспечено путем замещения процесса конденсации пара на его абсорбцию, что позволит в зависимости от применяемого рабочего тела увеличить полезную работу цикла, а также снизить необратимые потери при теплообмене и требования к температуре греющего источника за счет свойств бинарных рабочих тел. Повышение эффективности цикла Ренкина паротурбинных установок малой мощности, работающих при температурах пара перед турбиной 100-300°C в условиях утилизации теплоты, обуславливает актуальность темы настоящей работы.

Степень разработанности темы диссертации. Исследованиям цикла Ренкина и энергетических установок на его основе, а также анализу областей его применения в различные годы были посвящены работы многих ученых и инженеров. Среди них В.Я. Рыжкин, Н.Н. Ефимов, А.В. Щегляев, В.А. Кириллин, Л.Д. Берман. Исследованиями абсорбционных циклов (в первую очередь циклов абсорбционных преобразователей теплоты) занимались многие крупные отечественные ученые, среди которых В.М. Бродянский, Л.М. Розенфельд, Б.М. Блиер, И.С. Бадылькес, А.В. Бараненко, Л.С. Тимофеевский, Е.Я. Соколов, среди зарубежных исследователей – Р. Мольер, Ф. Меркель, Ф. Бошнякович, Э. Альтенкирх, Дж. Мэлони, А. Калина, О. Ибрагим. Значительный вклад в развитие эксергетического метода анализа технических систем (включая абсорбционные циклы) внесли В.М. Бродянский, Я. Шаргут, Р. Петела, Дж. Тсатсаронис. В то же время

малоизученными являются вопросы, связанные с исследованием циклов паротурбинных установок, в которых вместо конденсации пара используются иные процессы, например, абсорбция. В настоящем исследовании реализуется концепция модернизации цикла Ренкина путем замещения конденсации отработавшего пара на его абсорбцию и анализируется энергетическая эффективность решения для энергетических установок малой мощности в условиях утилизации сбросной теплоты среднего и низкого потенциала.

Цель диссертационной работы заключается в повышении энергетической эффективности паротурбинных установок малой мощности на базе цикла Ренкина, работающих при температурах пара перед турбиной 100-300°C в условиях утилизации теплоты, путем замещения конденсации отработавшего после турбины пара на процесс его абсорбции.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решаются следующие **задачи**:

- проведение анализа существующих технологий на базе цикла Ренкина, применяемых для утилизации теплоты предприятий и технологических установок;

- разработка модернизированного цикла Ренкина, в котором конденсация отработавшего после турбины пара замещена на процесс абсорбции, анализ эксплуатационных характеристик усовершенствованного цикла;

- разработка методики термодинамического и эксергетического анализа модернизированного цикла для водоаммиачного и бромистолитиевого растворов, разработка оптимизированных схемных решений цикла с целью совершенствования энергетических и эксплуатационных характеристик;

- проведение параметрического анализа модернизированного цикла и определение термодинамического и эксергетического совершенства разработанного решения в различных условиях работы и сравнение результатов с основными конкурирующими технологиями;

- проведение технико-экономического анализа промышленной конденсационной электрической станции на базе модернизированного цикла по сравнению с общепромышленным образцом и оценка срока окупаемости инвестиций.

Научная новизна:

1. Предложен способ повышения эффективности паросиловых энергоустановок малой мощности, за счет замещения процесса конденсации отработавшего после турбины пара на его абсорбцию путем совмещения паросилового цикла и цикла абсорбционного преобразователя теплоты. Выявлено, что в диапазоне температур пара перед турбиной 200-300°C модернизированный цикл Ренкина с бромистолитиевым раствором обеспечивает повышение энергетической эффективности по сравнению с циклом Ренкина на водяном паре в среднем на 4,1-9,1%, причем чем выше кратность циркуляции и концентрация слабого раствора, тем больше относительный прирост термического КПД. В диапазоне температур пара перед турбиной 100-200°C модернизированный цикл Ренкина с водоаммиачным раствором обеспечивает повышение энергетической эффективности по

сравнению с органическим циклом Ренкина с рабочим телом R142b в среднем на 11,3-21,5%, причем чем выше начальная температура пара, тем больше прирост термического КПД.

2. Разработана методика расчета паротурбинной установки, работающей по усовершенствованному циклу с абсорбцией пара с водоаммиачным и бромистолитиевым раствором, которая позволяет корректно определять концентрации рабочих потоков и термодинамические параметры с учетом особенностей функционирования термохимического насоса (контура абсорбер-генератор пара).

Теоретическая значимость работы:

- предложен способ повышения эффективности цикла Ренкина паротурбинных установок малой мощности, работающих при температурах пара перед турбиной 100-300°C в условиях утилизации теплоты, путем включения в технологию процесса абсорбции пара, что позволит повысить энергетическую эффективность паротурбинной установки в условиях утилизации теплоты;

- разработана методика термодинамического и эксергетического анализа модернизированного цикла, учитывающая особенности функционирования термохимического насоса, типы рабочих тел и различные схемные решения;

- проведен параметрический анализ цикла и получены графические зависимости энергетической эффективности цикла в различных условиях и в сравнении с конкурирующими технологиями.

Практическая значимость результатов заключается в разработке новых технических решений, обеспечивающих повышение эффективности работы паротурбинных установок малой мощности и дополнительную выработку электрической энергии в условиях утилизации теплоты низкого и среднего потенциала, за счет замещения конденсации отработавшего после турбины пара на процесс абсорбции в цикле Ренкина.

Степень достоверности результатов проведенных исследований. Достоверность полученных результатов диссертационной работы обеспечивается применением апробированных методов расчетов, основанных на фундаментальных законах технической термодинамики, теории тепло- и массообмена, обоснованностью принятых в работе допущений, согласованностью полученных результатов в предельных случаях с опубликованными данными других авторов, публикациями результатов исследования в рецензируемых научных изданиях.

Методология и методы исследований. В работе использованы методы математического моделирования, технической термодинамики и теории тепломассообмена, анализа и обработки информационных источников, технико-экономических расчетов в энергетике.

Положения, выносимые на защиту:

1. Технические решения, направленные на совершенствование цикла Ренкина паротурбинных установок малой мощности, работающих в условиях утилизации теплоты, путем замещения конденсации отработавшего после

турбины пара на процесс абсорбции с целью повышения энергетической эффективности.

2. Методика термодинамического и эксергетического анализа модернизированного цикла Ренкина, учитывающая особенности функционирования термохимического насоса, типы рабочих тел и различные схемные решения.

3. Результаты исследования энергетической эффективности модернизированного цикла в зависимости от параметров внешних источников и термохимического насоса.

Реализация результатов работы подтверждена актом внедрения в учебный процесс по кафедре «Тепловые электрические станции и теплотехника» ЮРГПУ(НПИ). Результаты исследования были рассмотрены и приняты в качестве вариантов реализации энергетических комплексов группы «РусГидро», что подтверждается актом внедрения. Результаты исследования были внедрены в качестве возможных решений по оптимизации работы станции в программу модернизации Новочеркасской ГРЭС.

Личное участие автора в получении результатов работы заключается в непосредственном выполнении всех этапов проведенных исследований, а именно: в анализе существующих технологий на базе цикла Ренкина, применяемых для утилизации теплоты энергетических и технологических установок; разработке модернизированного цикла Ренкина паротурбинных установок малой мощности, работающих в условиях утилизации теплоты, в котором конденсация отработавшего после турбины пара замещена на процесс абсорбции; анализе свойств рабочих веществ усовершенствованного цикла; разработке оптимизированных схемных решений с целью совершенствования энергетических и эксплуатационных характеристик цикла; разработке методики термодинамического и эксергетического анализа модернизированного цикла для водоаммиачного и бромистолитиевого раствора; проведении параметрического анализа модернизированного цикла и определении термодинамического и эксергетического совершенства разработанного решения в различных условиях работы и сравнении результатов с основными конкурирующими технологиями; выполнении технико-экономического анализа промышленной конденсационной электрической станции малой мощности на базе модернизированного цикла в сравнении с общепромышленным образцом и оценке срока окупаемости инвестиций; подготовке публикаций по теме исследования.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих мероприятиях: Международная научно-техническая конференция «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» (XXII Бенардосовские чтения), ИГЭУ им. В.И. Ленина, 2 июня 2023 г., г. Иваново; XLIV Международная научно-техническая конференция «Кибернетика энергетических систем», ЮРГПУ(НПИ), 2022 г., г. Новочеркасск; Региональная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых вузов Ростовской области Студенческая весна-2021, ЮРГПУ(НПИ), 2021 г., г. Новочеркасск; XLII Международная научно-

техническая конференция «Кибернетика энергетических систем», ЮРГПУ(НПИ), 2020 г., г. Новочеркасск; научные семинары кафедры «Тепловые электрические станции и теплотехника» ЮРГПУ(НПИ), г. Новочеркасск.

Соответствие паспорту специальности. По тематике и методике исследований диссертационная работа соответствует паспорту специальности 2.4.5 – Энергетические системы и комплексы в части направлений исследований – пункту 1. «Разработка научных основ (подходов) исследования общих свойств ... методов расчета ... показателей качества ... энергетических ... комплексов, ... на органическом ... топлив(е) ...»; пункту 3. «Разработка, исследование ... действующих и освоение новых технологий ... для производства электрической ... энергии, использования органического ... топлив(а) ... способов снижения негативного воздействия на окружающую среду ...»; пункту 5. «Разработки и исследования в области энергосбережения и ресурсосбережения при производстве ... электрической энергии ...».

Публикации. Результаты диссертационного исследования опубликованы в 12 печатных работах, в том числе 4 работах в изданиях, рекомендуемых ВАК при Минобрнауки России, 5 работах в материалах международных и отечественных конференций, 2 патентах РФ на изобретение, издано 1 учебное пособие.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, списка литературы, включающего 210 наименований. Изложена на 260 страницах машинописного текста, содержит 68 рисунков, 54 таблицы и 4 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, приведены научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Перечислены основные положения, выносимые на защиту, приведен перечень научно-технических конференций, на которых докладывались и обсуждались результаты исследования, описана структура и дано краткое содержание диссертации.

В первой главе рассмотрены источники вторичных энергетических ресурсов (ВЭР) и проанализированы варианты их полезного использования в зависимости от температурного потенциала. Одним из наиболее распространенных решений в данном направлении является утилизация сбросной теплоты с целью выработки электрической энергии. Для этих целей достаточно часто применяются паротурбинные установки (ПТУ) на базе цикла Ренкина, в котором в зависимости от температуры источника теплоты рабочим телом выступает вода или органические вещества. Так как в промышленности и энергетике имеется значительное количество тепловых источников низкого и среднего потенциала, то в последние годы распространение получили энергетические комплексы на базе ПТУ малой мощности для утилизации ВЭР в диапазоне температур 100-300°C. Несмотря на преимущества, обусловившие распространение ПТУ, для них характерен достаточно высокий уровень

тепловых потерь, обусловленных необратимостью основных процессов в цикле Ренкина, что в условиях утилизации теплоты и применения установок малой мощности ведет к еще большему снижению экономичности энергокомплексов. В этой связи актуальным является поиск способов, направленных на совершенствование ПТУ малой мощности, что может быть реализовано, в том числе, за счет изменения ряда процессов, протекающих в цикле. В частности, снижение тепловых потерь в цикле Ренкина может быть обеспечено за счет замещения процесса конденсации пара на его абсорбцию. Ранее за рубежом велись исследования подобного рода, которые показали перспективность данного направления.

Включение абсорбции в цикл Ренкина может быть реализовано за счет совмещения паросилового цикла и цикла абсорбционного преобразователя теплоты (АПТ). В таком случае перенос рабочего тела из зоны низкого в зону высокого давления будет осуществляться посредством ряда процессов абсорбции и десорбции рабочего тела, так называемого «термохимического насоса» по аналогии с АПТ. В качестве рабочего тела будет применен двухкомпонентный (бинарный) раствор. С целью реализации данной концепции вместо конденсатора и котла-утилизатора традиционного цикла Ренкина (ТЦР) применяются абсорбер и генератор пара, а также вспомогательные устройства – регенеративный теплообменник растворов (РТО-Р) и дроссельное устройство. Данное решение названо модернизированным циклом Ренкина (далее – МЦР).

Исходя из эффективности, степени изученности и опыта применения в качестве рабочих тел в МЦР рассматриваются водоаммиачный и бромистолитиевый растворы. В первом случае вода выступает абсорбентом, во втором – рабочим телом. Модернизированный цикл Ренкина с водоаммиачным раствором в качестве рабочего тела назван МЦР ($\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}$), с бромистолитиевым раствором – МЦР ($\text{LiBr} + \text{H}_2\text{O}$).

Во второй главе изложены научно обоснованные технические решения в части совершенствования цикла Ренкина путем замещения процесса конденсации отработавшего после турбины пара на его абсорбцию.

Схема МЦР ($\text{LiBr} + \text{H}_2\text{O}$) приведена на рисунке 1. Синим цветом обозначен контур рабочего тела, зеленым и красным – контуры слабого и крепкого растворов соответственно. Функционирование установки на базе МЦР ($\text{LiBr} + \text{H}_2\text{O}$) происходит следующим образом. В паровую турбину поступает перегретый водяной пар (с концентрацией $\xi_{\text{рт}} = 0$) при высоком давлении p_1 и температуре t_1 , где он расширяется до низкого давления и совершает полезную работу. Низкое давление (давление абсорбции) $p_{\text{аб}}$ определяется состоянием насыщения слабого раствора. Отработавший после турбины пар, имеющий давление $p_2 = p_{\text{аб}}$ и температуру t_2 , направляется в абсорбер, куда также поступает крепкий раствор с концентрацией $\xi_{\text{кр}}$ при низком давлении $p_8 = p_{\text{аб}}$ и температуре t_8 . В абсорбере при взаимодействии двух сред – крепкого раствора с концентрацией $\xi_{\text{кр}}$ (абсорбента) и водяного пара с концентрацией $\xi_{\text{рт}}$ (рабочего тела) – происходит процесс абсорбции, вследствие чего пар поглощается абсорбентом. В процессе абсорбции концентрация раствора снижается, так как

определяется по абсорбенту (бромиду лития). Образовавшийся слабый раствор имеет концентрацию $\xi_{\text{сл}}$. Теплота абсорбции $q_{\text{аб}}$, выделяющаяся в ходе процесса, отводится посредством охлаждающего теплоносителя с температурой $t_{\text{охл}} = t_9$ в окружающую среду (по аналогии с теплотой конденсации).

Слабый раствор поступает в питательный насос, где происходит повышение давления с $p_3 = p_{\text{аб}}$ до p_4 , а затем направляется в РТО-Р, в котором осуществляется его нагрев до температуры t_5 за счет теплоты крепкого раствора. После РТО-Р слабый раствор поступает в генератор пара (десорбер), куда подводится внешняя теплота $q_{\text{гп}}$ посредством греющего теплоносителя с температурой $t_{\text{гр}} = t_{11}$. В процессе подвода теплоты осуществляется нагрев и кипение раствора при высоком давлении, вследствие чего происходит десорбция, то есть выпаривание из слабого раствора водяного пара и образование

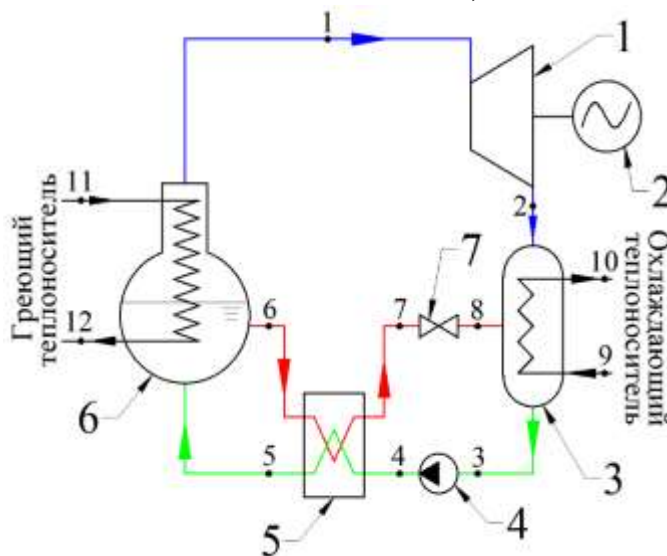


Рисунок 1 – Схема МЦР (LiBr + H₂O):
1 – паровая турбина; 2 – электрический генератор; 3 – абсорбер; 4 – питательный насос; 5 – регенеративный теплообменник растворов (РТО-Р); 6 – генератор пара; 7 – дроссельное устройство

крепкого раствора с концентрацией $\xi_{\text{кр}}$. Концентрация раствора повышается ($\xi_{\text{кр}} > \xi_{\text{сл}}$). Крепкий раствор под действием высокого давления p_6 при температуре t_6 направляется в РТО-Р, где за счет теплообмена со слабым раствором охлаждается до температуры t_7 , а затем поступает в дроссельное устройство, где дросселируется до низкого давления $p_8 = p_{\text{аб}}$ и направляется в абсорбер. Водяной пар, выделившийся из раствора в процессе десорбции, направляется в турбину. Цикл замыкается.

На рисунке 2 приведен МЦР (LiBr + H₂O) в T - s диаграмме, а на рисунке 3 – в p - t - ξ диаграмме. Основные процессы цикла: 1-2 – расширение пара в турбине; 2-3 – абсорбция отработавшего после турбины пара крепким раствором; 3-4 – сжатие слабого раствора в насосе (процесс не показан); 4-5 – нагрев слабого раствора в РТО-Р; 5-5' – нагрев слабого раствора в генераторе пара до температуры насыщения; 5'-1 – десорбция пара из слабого раствора и перегрев пара; 5'-6 – образование крепкого раствора в процессе десорбции пара и кипения слабого раствора при подводе внешней теплоты; 6-7 – охлаждение крепкого раствора в РТО-Р; 7-8 – дросселирование крепкого раствора (процесс не показан); 8-3 – образование слабого раствора в процессе абсорбции пара при отводе теплоты.

Приведенная на диаграммах точка $2^{\text{ТЦР}}$ характеризует давление, до которого происходило бы расширение пара в случае с ТЦР при наличии конденсатора, то есть давление насыщения чистой воды (давление конденсации $p_{\text{к}}$). В случае с МЦР (LiBr + H₂O) при использовании абсорбера вместо

конденсатора расширение пара будет происходить до давления насыщения слабого раствора (давления абсорбции $p_{аб}$). Исходя из диаграммы видно, что в последнем случае при прочих равных условиях (заданной температуре охлаждающего источника $t_{охл}$ и равных температурных напорах в конденсаторе и абсорбере $\Delta t_k = \Delta t_{аб}$) процесс расширения пара в турбине будет происходить до более низкого давления $p_{аб}$. Это объясняется законом Рауля, в соответствии с которым при заданной температуре жидкой фазы давление паров (в данном случае – водяных) над раствором всегда будет меньше, чем над чистым рабочим веществом. Вследствие этого перепад давлений и, как следствие, полезная работа турбины в установке, работающей на базе МЦР (LiBr + H₂O), будет выше, чем в случае с ТЦР.

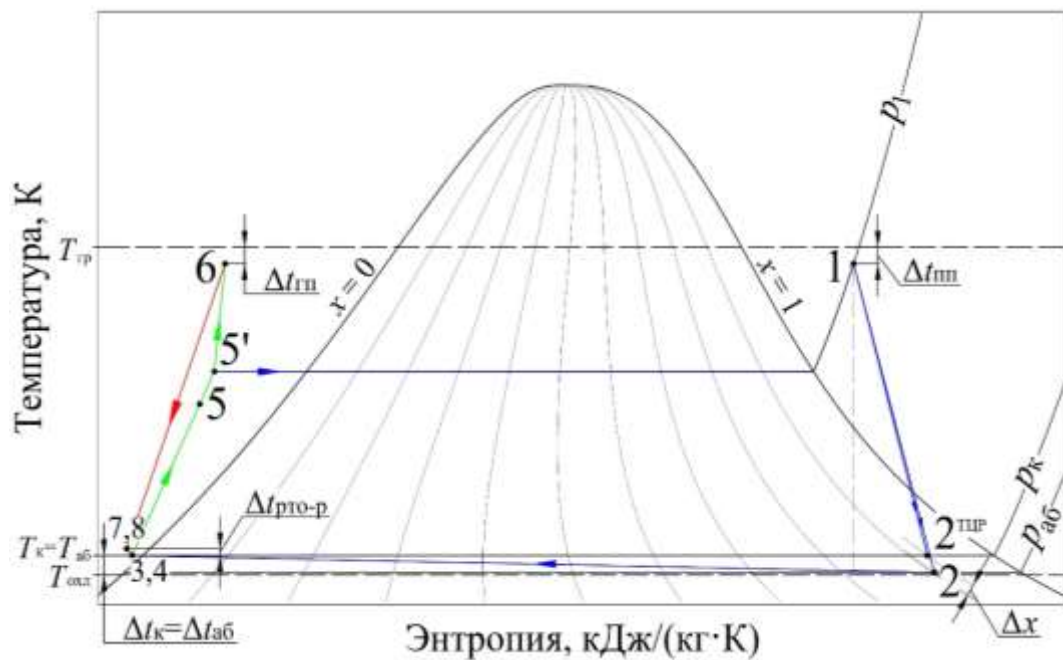


Рисунок 2 – МЦР (LiBr + H₂O) в T-s диаграмме

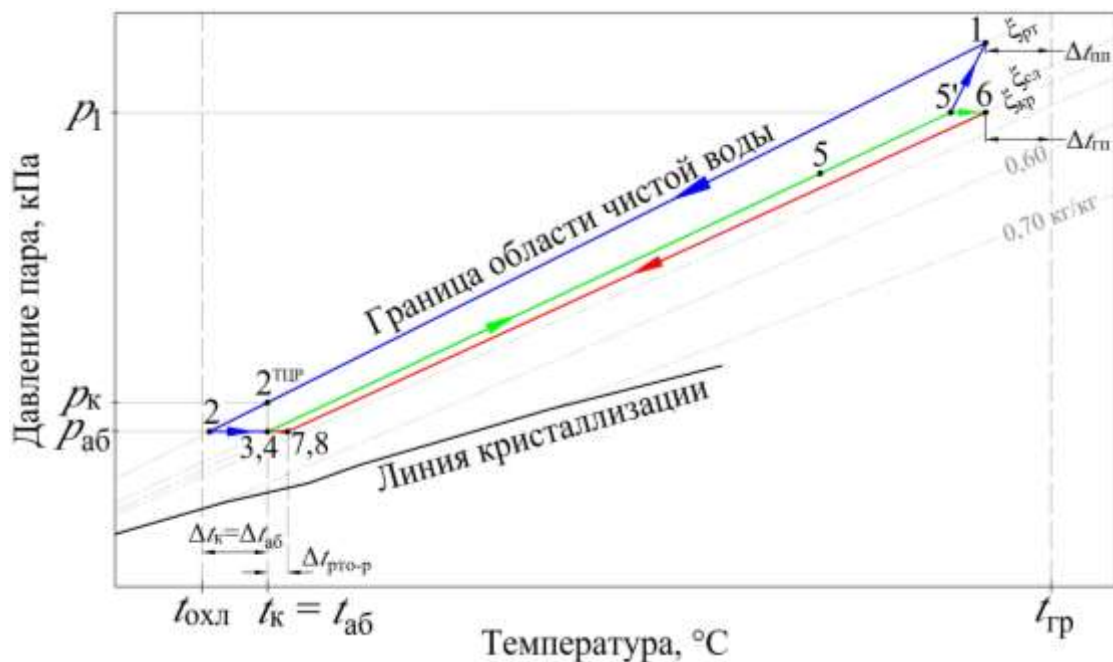


Рисунок 3 – МЦР (LiBr + H₂O) в p-t-ξ диаграмме

Еще одним фактором, обеспечивающим повышение энергетической эффективности модернизированного цикла, является повышение средней температуры подвода теплоты в цикл, что достигается за счет применения регенерации теплоты растворов. Данное решение предполагает включение в схему ПТУ регенеративного теплообменника растворов (РТО-Р), обеспечивающего нагрев слабого раствора за счет охлаждения крепкого, что ведет к снижению количества подводимой и отводимой теплоты. По сравнению с регенеративным подогревом питательной воды (в ТЦР) регенерация теплоты растворов позволяет обеспечить большую электрическую мощность установки N в условиях, когда тепловая мощность источника теплоты ограничена. Кроме того, данное решение характеризуется большей эффективностью в условиях работы установок малой мощности (при низких параметрах пара).

Схема МЦР ($\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}$) аналогична схеме, приведенной на рисунке 1. Однако в случае с водоаммиачным раствором зеленым цветом обозначен крепкий раствор, а красным – слабый. На рисунке 4 данный цикл приведен в T - s диаграмме, а на рисунке 5 – в h - ξ диаграмме.

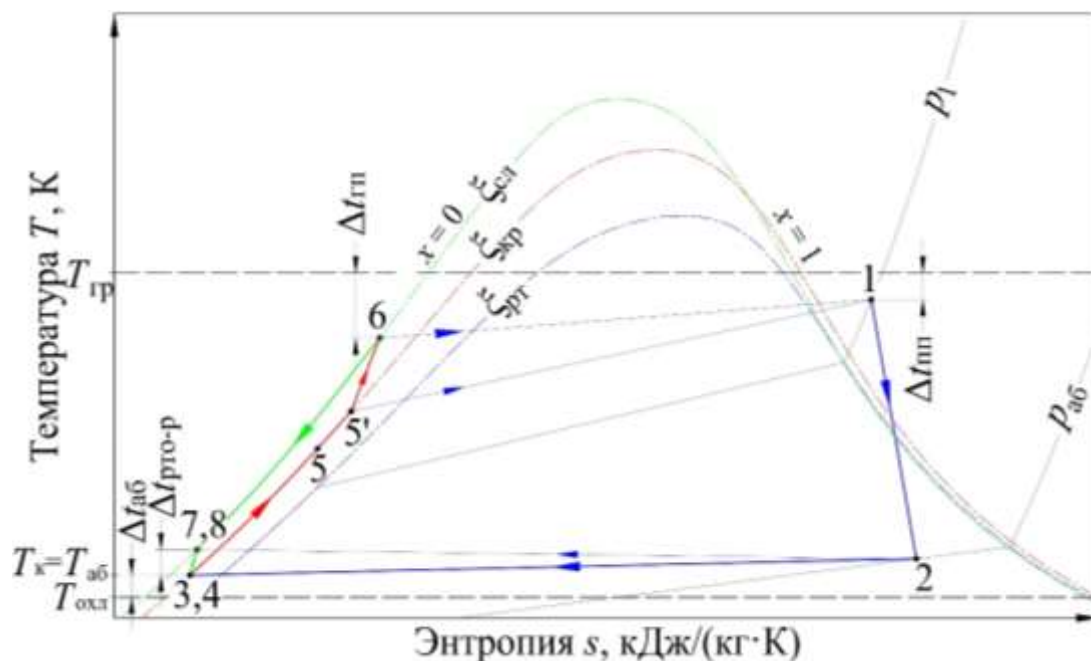


Рисунок 4 – МЦР ($\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}$) в T - s диаграмме

Работа установки на базе МЦР ($\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}$) происходит в целом аналогично изложенному выше принципу работы МЦР ($\text{LiBr} + \text{H}_2\text{O}$), но с учетом особенностей, характерных для водоаммиачного раствора. Концентрация смеси определяется по рабочему телу (аммиаку), поэтому в процессе абсорбции концентрация смеси повышается и образуется крепкий раствор, в то время как при десорбции – наоборот. Еще одной особенностью является летучесть, что обусловлено малой разностью температур кипения компонентов. Вследствие этого в турбину направляется смесь паров аммиака и воды. Разумеется, что в таком случае концентрация, которая в зависимости от условий работы установки может колебаться в широких пределах, оказывает существенное влияние на свойства вещества.

Основные процессы цикла: 1-2 – расширение пара в турбине; 2-3 – абсорбция отработавшего после турбины пара слабым раствором; 3-4 – сжатие крепкого раствора в насосе (процесс не показан); 4-5 – нагрев крепкого раствора в РТО-Р; 5-5' – нагрев крепкого раствора в генераторе пара до температуры насыщения; 5'-1 – десорбция пара из крепкого раствора и перегрев пара; 5'-6 – образование слабого раствора в процессе десорбции и кипения крепкого раствора при подводе теплоты; 6-7 – охлаждение слабого раствора в РТО-Р; 7-8 – дросселирование слабого раствора (процесс не показан); 8-3 – образование слабого раствора в процессе абсорбции при отводе теплоты.

Возможность регулирования концентрации позволяет изменять температуру кипения рабочего тела в зависимости от имеющихся источников теплоты. Так как аммиак является низкокипящим веществом, то это позволяет применять МЦР ($\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}$) даже в условиях источников теплоты низкого потенциала и конкурировать в данном направлении с органическим циклом Ренкина (ОЦР).

Также во второй главе был разработан ряд схемных решений МЦР, преимуществом которого является возможность совершенствования схемы как в паросиловой части (схема с регенерацией теплоты рабочего тела), так и в термохимическом насосе (схема с регенерацией теплоты растворов, схема с дефлегмацией). Наиболее эффективной является схема с регенерацией теплоты растворов, приведенная на рисунке 1.

В третьей главе выполнена разработка методик

термодинамического и эксергетического анализа модернизированного цикла Ренкина. В рамках данной задачи был выполнен анализ методик расчета циклов Ренкина и АПТ, который показал, что их простое комбинирование не позволяет выполнить корректный расчет МЦР, так как базовые циклы не в полной мере учитывают особенности модернизированного цикла и протекающих в нем процессов, а также имеют ряд допущений (в частности, способ определения рабочих давлений и концентраций в АПТ).

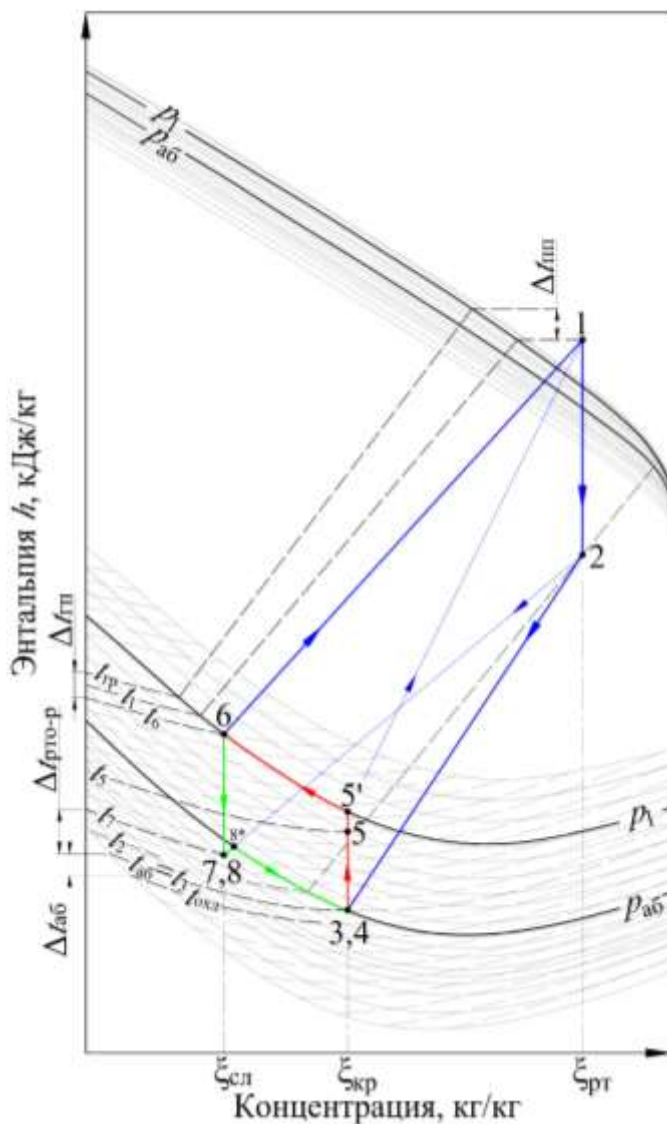


Рисунок 5 – МЦР ($\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}$) в h - ξ диаграмме

Методика термодинамического анализа МЦР базируется на материальном балансе «термохимического насоса», который отличается для водоаммиачного и бромистолитиевого растворов ввиду различий их свойств (рисунок 6). В этом случае универсальным параметром, позволяющим учитывать влияние «термохимического насоса» на работу цикла, является кратность циркуляции f (отношение расхода раствора, поступающего в генератор пара, к расходу пара, поступающего в турбину).

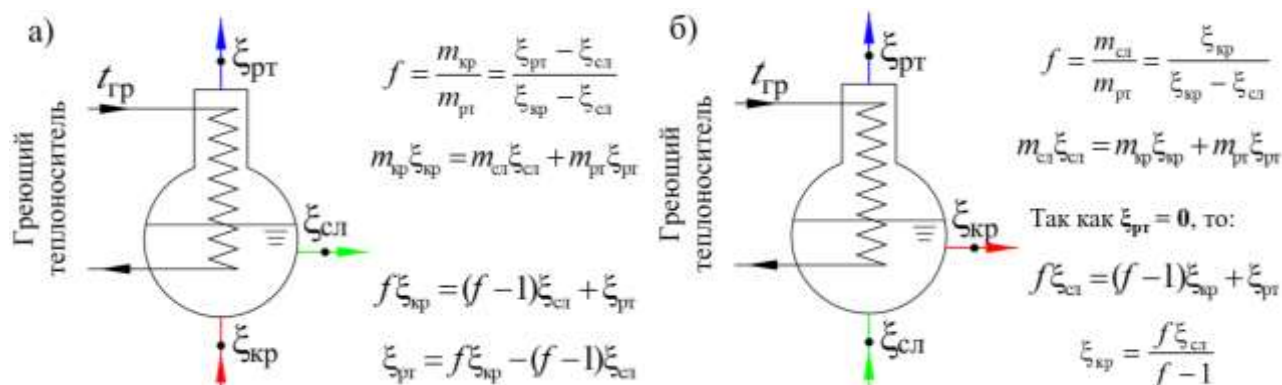


Рисунок 6 – Материальный баланс генератора пара:
а) МЦР ($\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}$); б) МЦР ($\text{LiBr} + \text{H}_2\text{O}$)

На следующем этапе была выполнена разработка методики эксергетического анализа основная особенность которой заключается в определении эксергетической эффективности абсорбера. При анализе АПТ абсорбер рассматривается как теплообменный аппарат, обеспечивающий приращение эксергии рабочего тела или теплоносителя. В случае с МЦР абсорбер должен рассматриваться как конденсатор ПТУ, то есть диссипативный элемент, основной задачей которого является отвод теплоты в окружающую среду. В остальном методика эксергетического анализа МЦР аналогична методикам для циклов Ренкина и АПТ.

В четвертой главе на основании разработанных методик термодинамического и эксергетического анализа выполнен параметрический анализ МЦР и сравнение его эффективности с ТЦР и ОЦР. Для оценки эффективности рассматриваемых циклов был выполнен базовый вариант расчета при следующих основных исходных данных: $t_{\text{гр}} = 215^\circ\text{C}$; $t_1 = 200^\circ\text{C}$; $t_{\text{охл}} = 20^\circ\text{C}$; $\Delta t_{\text{аб}} = t_{\text{кд}} = 15^\circ\text{C}$; $f = 7$; $\eta_{\text{oi.т}} = 0,75$. Результаты приведены на рисунке 7. По левой оси отложены значения потерь эксергии в основных элементах циклов, по правой оси – термический $\eta_{\text{т}}$ и эксергетический $\eta_{\text{экс}}$ КПД, а также КПД теплосиловой установки $\eta_{\text{уст}}$. Исходя из представленных результатов видно, что МЦР ($\text{LiBr} + \text{H}_2\text{O}$) характеризуется наивысшими значениями $\eta_{\text{т}}$, $\eta_{\text{экс}}$ и $\eta_{\text{уст}}$, которые превышают соответствующие значения ТЦР, ОЦР (R141b) и МЦР ($\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}$). В частности, для МЦР ($\text{LiBr} + \text{H}_2\text{O}$) $\eta_{\text{т}} = 0,2904$, что на 5,87% выше (на 0,0161 в абсолютном выражении), чем $\eta_{\text{т}}$ ТЦР. Относительно МЦР ($\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}$) и ОЦР (R141b) прирост термического КПД $\Delta\eta_{\text{т}}$ составляет 13,77% и 20,53% соответственно (0,0352 и 0,0495 в абсолютном выражении). Повышение эффективности МЦР ($\text{LiBr} + \text{H}_2\text{O}$) складывается из увеличения полезной работы турбины и повышения средней температуры подвода теплоты.

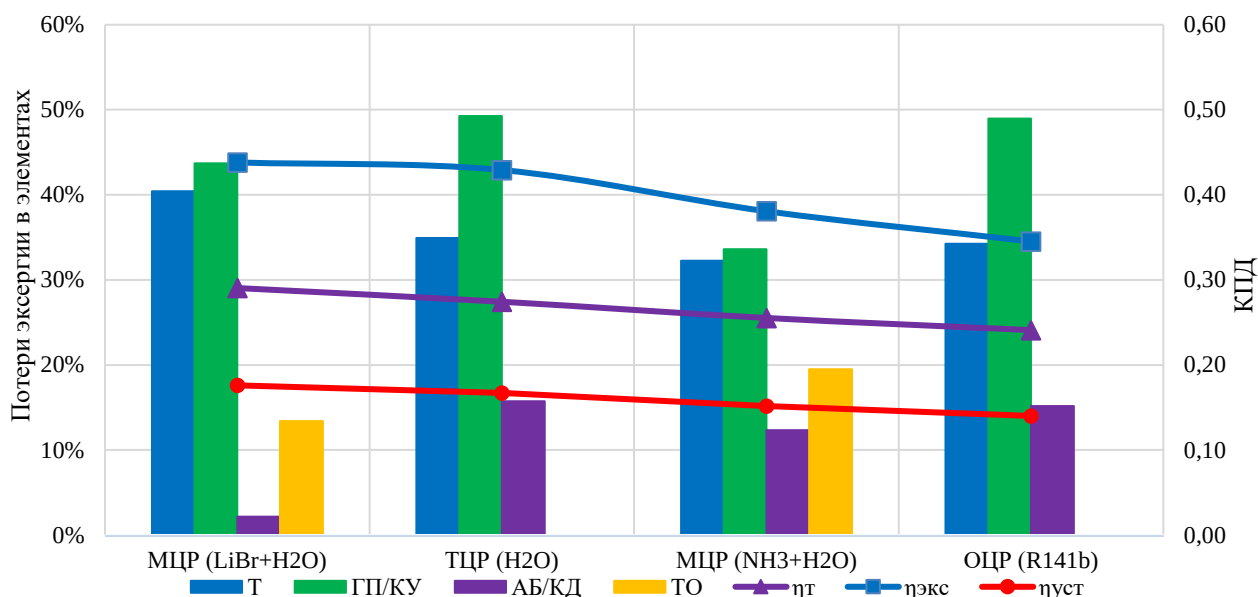


Рисунок 7 – Результаты базового варианта расчета циклов:

T – паровая турбина; ГП – генератор пара; КУ – котел-утилизатор;
АБ – абсорбер; КД – конденсатор; ТО – регенеративный теплообменник

В рамках параметрического анализа было оценено влияние на характеристики цикла различных параметров, среди которых начальные параметры пара, температура охлаждающего источника, внутренний относительный КПД турбины, а также параметры, характеризующие работу термохимического насоса. Начальная температура пара была проанализирована в диапазоне $t_1 = 100-300^\circ\text{C}$ ($t_{гр} = 115-315^\circ\text{C}$).

Исходя из практики применения ПТУ, для диапазона $t_1 = 115-215^\circ\text{C}$ рассматривались ОЦР и МЦР ($\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}$), в то время как для диапазона $t_1 = 215-315^\circ\text{C}$ – ТЦР и МЦР ($\text{LiBr} + \text{H}_2\text{O}$). На рисунке 8 приведена зависимость η_t и $\eta_{экс}$ МЦР ($\text{LiBr} + \text{H}_2\text{O}$) и ТЦР от начальной температуры пара при $t_1 = 200-300^\circ\text{C}$, а на рисунке 9 – зависимость η_t и $\eta_{экс}$ КПД МЦР ($\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}$) и ОЦР от начальной температуры пара при $t_1 = 100-200^\circ\text{C}$. Анализ МЦР произведен для нескольких значений f .

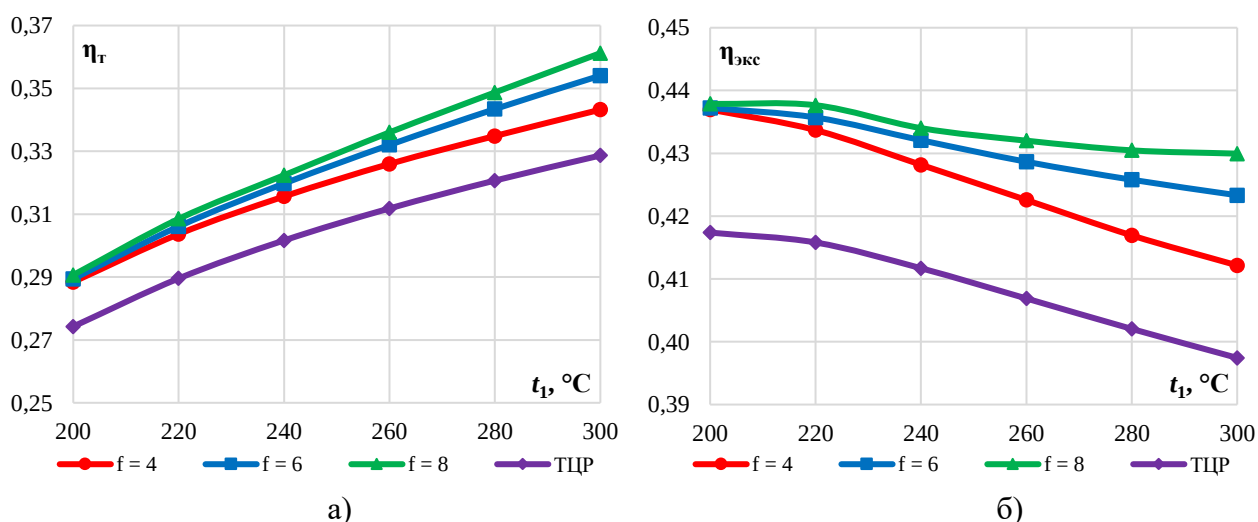


Рисунок 8 – Зависимость КПД МЦР ($\text{LiBr} + \text{H}_2\text{O}$) и ТЦР при $t_1 = 200-300^\circ\text{C}$:
а) термического КПД; б) эксергетического КПД

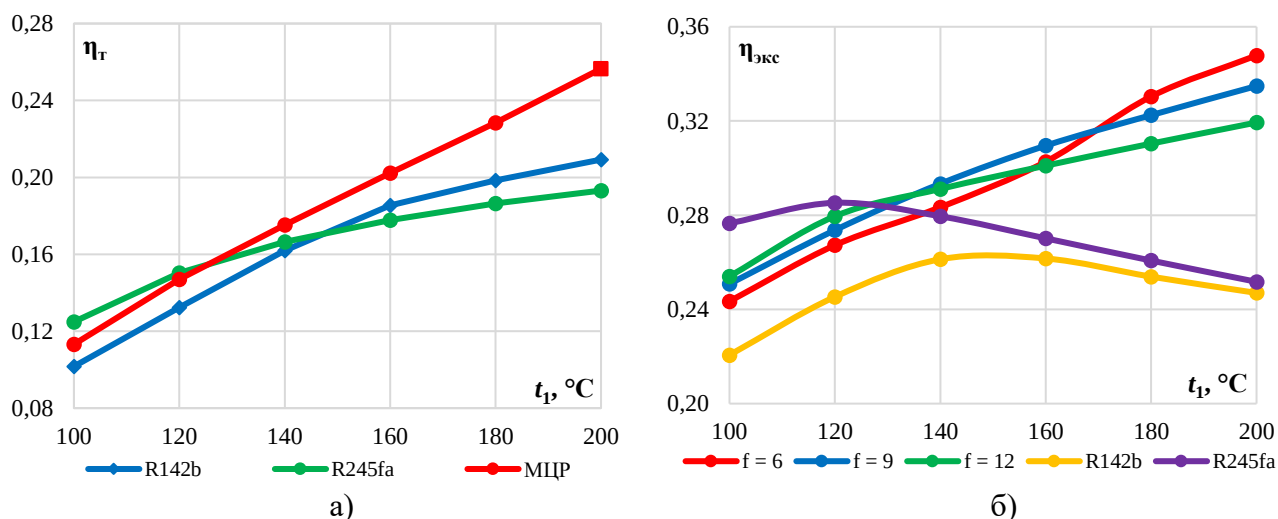


Рисунок 9 – Зависимость КПД МЦР ($\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}$) и ОЦР при $t_1 = 100\text{-}200^\circ\text{C}$:
а) термического КПД; б) эксергетического КПД

Исходя из рисунка 8 видно, что η_t МЦР ($\text{LiBr} + \text{H}_2\text{O}$) во всем рассматриваемом диапазоне температур выше, чем у ТЦР в среднем на 4,1-9,1%. При этом, с увеличением f растет и эффективность МЦР. Последнее обусловлено тем, что с ростом f увеличивается концентрация слабого раствора $\xi_{\text{сл}}$ в абсорбере и тепловая мощность РТО-Р. Первый фактор обеспечивает снижение давления насыщения в абсорбере и увеличение работы турбины, второй – более высокую степень нагрева слабого раствора после РТО-Р.

Исходя из рисунка 9 видно, что η_t МЦР ($\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}$) во всем исследуемом диапазоне выше η_t ОЦР (с рабочими веществами R142b и R245fa) в среднем на 11,3-21,5%. Исключением является ОЦР (R245fa), эффективность которого в диапазоне $t_1 = 100\text{-}120^\circ\text{C}$ выше, чем у МЦР ($\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}$), что объясняется эффективностью рабочего вещества R245fa в условиях, когда источник теплоты имеет низкую температуру ($t_{\text{гр}} < 140^\circ\text{C}$). Для зависимости η_t от t_1 , приведенной на рисунке 9, а), приводится максимальное значение КПД МЦР ($\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}$) независимо от f , так как выявлено, что исходя из значения t_1 (и $t_{\text{гр}}$) увеличение f может как снижать, так и повышать эффективность цикла. В частности, при $t_1 = 100\text{-}150^\circ\text{C}$ снижение f ведет к уменьшению η_t , в то время как при $t_1 > 150^\circ\text{C}$ – наоборот. Это обусловлено тем, что при низких значениях t_1 и p_1 величина f может быть недостаточна для обеспечения необходимой концентрации аммиака, при которой пар с заданными параметрами t_1 и p_1 будет перегретым. Таким образом, чем выше температура источника теплоты, тем ниже должно быть значение f для обеспечения большей эффективности.

Дополнительно был выполнен анализ влияния на МЦР параметров «термохимического насоса» – величины недовыпаривания $\Delta\xi_{\text{гп}}$ и недонасыщения $\Delta\xi_{\text{аб}}$ раствора, конечная разность температур в РТО-Р $\Delta t_{\text{рто-р}}$, интервал дегазации $\Delta\xi$. Результаты расчетов показали, что наибольшее влияние на эффективность цикла оказывает величина $\Delta t_{\text{рто-р}}$ (чем ниже разность температур, тем выше η_t). Параметры $\Delta\xi_{\text{гп}}$, $\Delta\xi_{\text{аб}}$ и $\Delta\xi$ в большей степени влияют на эффективность МЦР ($\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}$), так как в данном цикле значения $\xi_{\text{рт}}$, $\xi_{\text{кр}}$ и $\xi_{\text{сл}}$ взаимосвязаны. Анализ влияния температуры охлаждающего теплоносителя показал, что в МЦР с повышением $t_{\text{охл}}$ значение η_t снижается в меньшей степени, чем в ТЦР и ОЦР.

Также был выполнен термодинамический анализ промышленной конденсационной электрической станции на базе паровой турбины К-3-1,275 ($N = 3,0$ МВт при $t_1 = 280^\circ\text{C}$, $p_1 = 1275$ кПа, $p_2 = 10,4$ кПа, расход пара $m_{\text{рт}} = 20,4$ т/ч) для условий утилизации сбросной теплоты. Так как основной задачей являлось обеспечение максимальной выработки электрической энергии при заданной тепловой мощности источника теплоты, то рассматривалась схема ТЦР без регенеративного подогрева питательной воды. Результаты расчетов и сравнение МЦР (LiBr + H₂O) с ТЦР приведены в таблице 1.

Исходя из приведенных результатов видно, что применение модернизированного цикла обеспечивает повышение КПД паротурбинной установки на 6,4% и электрической мощности на 194,45 кВт.

Таблица 1 – Результаты расчетов энергокомплексов на базе МЦР (LiBr + H₂O) и ТЦР

Параметр	Ед. изм.	ТЦР	МЦР	Δ (МЦР – ТЦР)		
Теоретические характеристики цикла						
Теоретическая работа турбины	$l_{\text{т}}$	кДж/кг	802,1	937,8	135,7	16,9%
Теоретическая работа насоса	$l_{\text{н}}$	кДж/кг	1,8	10,7	8,9	494%
Удельная тепловая нагрузка котла-утилизатора / генератора пара	$q_{\text{ку}} / q_{\text{гп}}$	кДж/кг	2 803,48	3 025,5	222,02	7,9%
Удельная тепловая нагрузка конденсатора / абсорбера	$q_{\text{конд}} / q_{\text{аб}}$	кДж/кг	2 003,18	2 098,41	95,23	4,8%
Удельная тепловая нагрузка РТО-Р	$q_{\text{рто-р}}$	кДж/кг	–	2 958,33	–	–
Термический КПД	$\eta_{\text{т}}$	–	0,2855	0,3064	0,0209	7,3%
Действительные характеристики установки						
Электрическая мощность турбины	$N_{\text{т}}$	кВт	3 013,89	3 271,04	257,15	8,5%
Электрическая мощность насоса	$N_{\text{н}}$	кВт	13,89	76,59	62,7	451%
Электрическая мощность установки	N	кВт	3 000,0	3 194,45	194,45	6,48%
Тепловая мощность источника теплоты	$Q_{\text{ист}}$	кВт	17 647,7	–	–	–
Тепловая мощность котла-утилизатора / генератора пара	$Q_{\text{ку}} / Q_{\text{гп}}$	кВт	15 882,9	–	–	–
Тепловая мощность конденсатора / абсорбера	$Q_{\text{конд}} / Q_{\text{аб}}$	кВт	12 558,2	12 338,83	-219,46	-1,7%
Тепловая мощность РТО-Р	$Q_{\text{рто-р}}$	кВт	–	15 550,18	–	–
КПД установки	$\eta_{\text{уст}}$	–	0,1701	0,1810	0,0109	6,4%

В пятой главе выполнено технико-экономическое обоснование применения МЦР (LiBr + H₂O) для варианта, рассмотренного в главе 4. Был выполнен расчет капиталовложений в основное оборудование и материалы для энергокомплексов на базе МЦР (LiBr + H₂O) и ТЦР, а также оценка эксплуатационных затрат. Расчет показал, что капиталовложения в энергокомплекс на базе МЦР (LiBr + H₂O) на 10,6% (14,052 млн руб.) выше, чем в случае с ТЦР. Одной из крупных затрат при реализации МЦР является приобретение раствора бромида лития. На рисунке 10 приведен финансовый профиль проекта и срок окупаемости инвестиций.

Технико-экономический анализ показал, что в условиях утилизации сбросной теплоты за счет прироста электрической мощности установки (194,45 кВт) энергокомплекс на базе МЦР (LiBr + H₂O) обеспечивает существенный рост в годовой выработке электроэнергии, который компенсирует прирост капиталовложений и эксплуатационных затрат, что обеспечивает достаточно высокий срок окупаемости инвестиций. При оценке затрат была учтена инфляционная составляющая.

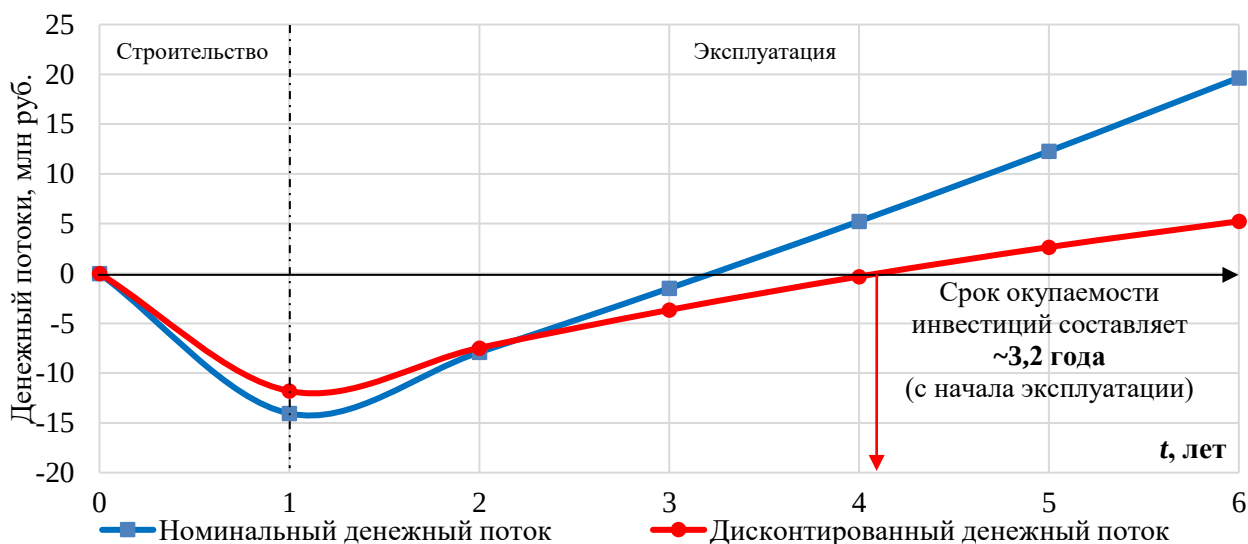


Рисунок 10 – Финансовый профиль проекта реализации МЦР

С ростом температуры греющего источника и коэффициента использования установленной мощности прирост в годовой выработке электроэнергии растет вследствие чего снижается срок окупаемости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложены научно-обоснованные технические решения в части совершенствования цикла Ренкина паротурбинных установок малой мощности, работающих в условиях утилизации теплоты при температурах пара перед турбиной 100-300°C, путем замещения конденсации отработавшего пара процессом его абсорбции, разработаны оптимизированные схемные решения цикла с целью совершенствования энергетических и эксплуатационных характеристик.

2. Разработана методика термодинамического и эксергетического анализа модернизированного цикла для водоаммиачного и бромистолитиевого раствора.

3. Проведен параметрический анализ модернизированного цикла и определение термодинамического и эксергетического совершенства разработанного решения в различных условиях работы и сравнение результатов с основными конкурирующими технологиями.

Выявлено, что в диапазоне температур пара перед турбиной 200-300°C модернизированный цикл Ренкина с бромистолитиевым раствором обеспечивает повышение энергетической эффективности по сравнению с циклом Ренкина на водяном паре в среднем на 4,1-9,1%, причем чем выше кратность циркуляции и концентрация слабого раствора, тем больше относительный прирост термического КПД.

Выявлено, что в диапазоне температур пара перед турбиной 100-200°C модернизированный цикл Ренкина с водоаммиачным раствором обеспечивает повышение энергетической эффективности по сравнению с органическим циклом Ренкина с рабочим телом R142b в среднем на 11,3-21,5%, причем чем выше кратность циркуляции и начальная температура пара, тем больше относительный прирост термического КПД.

Проведен термодинамический анализ МЦР ($\text{LiBr} + \text{H}_2\text{O}$) в сравнении паротурбинной установкой на базе паровой турбины К-3-1,275 ($N = 3,0$ МВт при $t_1 = 280^\circ\text{C}$, $p_1 = 1275$ кПа, $p_2 = 10,4$ кПа, $m_{\text{рт}} = 20,4$ т/ч). Приведенные результаты показывают, что применение МЦР позволяет повысить термический КПД цикла η_t на 0,0209 (7,3% в относительном выражении) и КПД теплосиловой установки $\eta_{\text{уст}}$ на 0,0109 (6,4% в относительном выражении). Прирост электрической мощности установки составляет 6,48%.

4. Выполнен технико-экономический анализ промышленной конденсационной электрической станции малой мощности на базе модернизированного цикла в сравнении с общепромышленным образцом и оценен срок окупаемости инвестиций.

При стоимости электроэнергии 9,42 руб/кВт·ч, себестоимости отпущенной электроэнергии 2,10 руб/кВт·ч и дополнительном годовом отпуске $\Delta W_{\text{отп.МЦР}} = 1\,290$ МВт·ч/год ежегодные денежные поступления будут составлять порядка 9,45 млн руб/год. При таком варианте инвестиции окупаются примерно за 4,2 года от начала реализации проекта (через 3,2 года с начала эксплуатации объекта).

Выявлено, что срок окупаемости инвестиций в МЦР сокращается при увеличении электрической мощности станции, увеличении числа часов использования установленной мощности или при росте стоимости отпускаемой электроэнергии, что объясняется повышением электрической мощности станции на 6,48%, позволяя обеспечить больший экономический эффект при реализации ПТУ на базе МЦР.

Практическая реализация результатов работы подтверждена актом внедрения в учебный процесс ЮРГПУ(НПИ). Результаты исследования были рассмотрены и приняты в качестве вариантов реализации энергетических комплексов группы «РусГидро», что подтверждается актом внедрения. Результаты исследования были внедрены в качестве возможных решений по оптимизации работы станции в программу модернизации Новочеркасской ГРЭС.

Рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы исследования диссертационной работы. Направления исследований диссертационной работы будут продолжены в части оптимизации схемных решений, исследований процессов тепло- и массообмена, уточнения характеристик оборудования в условиях работы МЦР, поиск оптимальных рабочих веществ.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в изданиях по списку ВАК

1. Добрыдnev, Д.В. Исследование влияния схемных решений на электрическую мощность турбоустановки модернизированного цикла Ренкина / Д.В. Добрыдnev, В.В. Папин, Р.В. Безуглов, Н.А. Ведмичев // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2024. – Т. 67, №2. – С. 108-123.

2. **Добрыднев, Д.В.** Расчет модернизированного цикла Ренкина с бромисто-литиевым раствором в качестве рабочего тела / Д.В. Добрыднев, В.В. Папин, Р.В. Безуглов, Н.Н. Ефимов, Е.М. Дьяконов, А.С. Шмаков // Теплоэнергетика. – 2024. – №2. – С. 3-14.

Переводная версия: Dobrydnev, D.V. Calculation of an Upgraded Rankine Cycle with Lithium Bromide Solution As a Working Flow / D.V. Dobrydnev, V.V. Papin, R.V. Bezuglov, N.N. Efimov, E.M. D'yakonov, A.S. Shmakov // Thermal Engineering. – 2024. – Vol. 71, No. 2. – P. 97-107 (индексируется в наукометрических международных базах цитирования Scopus и Springer).

3. Папин, В.В. Анализ способов повышения эффективности абсорбционного и модернизированного паросилового цикла / В.В. Папин, Р.В. Безуглов, **Д.В. Добрыднев**, Е.М. Дьяконов, А.С. Шмаков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2023. – Т. 23, №2. – С. 83-93.

4. Папин, В.В. Модернизированный паросиловой цикл, работающий по абсорбционному принципу / В.В. Папин, Н.Н. Ефимов, **Д.В. Добрыднев**, Е.М. Дьяконов, Р.В. Безуглов, А.С. Шмаков // Промышленная энергетика. – 2022. – №1. – С. 18-27.

Патенты на изобретения РФ

5. Пат. 2759583 С1 Российская Федерация, МПК F 01 К 25/08. Теплоэлектростанция и способ ее работы / Папин В.В., Безуглов Р.В., Дьяконов Е.М., Ефимов Н.Н., Янучок А.И., **Добрыднев Д.В.** ; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова» – № 2020134328 ; заявл. 19.10.2020; опубл. 15.11.2021. – 10 с.

6. Пат. 2787622 С1 Российская Федерация, МПК F 01 К 25/08. Теплоэлектростанция с системой регенерации и способ ее работы / Папин В.В., Безуглов Р.В., **Добрыднев Д.В.**, Шмаков А.С., Филимонов В.Р., Янучок А.И., Ведмичев Н.А. ; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова» – № 2022120000 ; заявл. 21.07.2022; опубл. 11.01.2023. – 12 с.

Полные тексты докладов конференций

7. **Добрыднев, Д.В.** Исследование модернизированного паросилового цикла с бромистолитиевым раствором в качестве рабочего тела / Д.В. Добрыднев, В.В. Папин, Р.В. Безуглов, Е.М. Дьяконов, А.С. Шмаков // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XXII Бенардосовские чтения): Материалы Международной научно-технической конференции, посвященной 75-летию теплоэнергетического факультета, Иваново, 31 мая – 02 июня 2023 года. Том 2. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2023. – С. 425-431.

8. Папин, В.В. Оптимизация схемных решений модернизированного паросилового цикла / В.В. Папин, Р.В. Безуглов, Е.М. Дьяконов, **Д.В. Добрыднев**, А.С. Шмаков, М.Р. Марданов // Кибернетика энергетических систем: сборник материалов XLIV Международной научно-технической конференции, г. Новочеркасск, 8-10 ноября 2022 г. / Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова. – Новочеркасск: ЮРГПУ(НПИ), 2023. – С. 392-396.

9. **Добрыднев, Д.В.** Этапы разработки модернизированного паросилового цикла / Д.В. Добрыднев, В.В. Папин, Е.М. Дьяконов, Р.В. Безуглов, А.И. Янучок // Студенческая научная весна – 2021: материалы региональной научно-технической конференции (конкурса научно-технических работ) студентов, аспирантов и молодых ученых вузов Ростовской области, г. Новочеркасск, 13–14 мая 2021 г. / Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова. – Новочеркасск: ЮРГПУ(НПИ), 2021. – С. 106-108.

10. Дьяконов, Е.М. Рабочие вещества для предлагаемого способа работы паросилового цикла / Е.М. Дьяконов, В.В. Папин, Р.В. Безуглов, **Д.В. Добрыднев**, А.И. Янучок, Д.К. Мельниченко // Кибернетика энергетических систем : сборник материалов XLII Международной научно-технической конференции, г. Новочеркасск, 24-26 ноября 2020 г. / Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова. – Новочеркасск: ЮРГПУ(НПИ), 2020. – С. 284-286.

11. Дьяконов, Е.М. Способ повышения энергетической эффективности паросилового цикла / Е.М. Дьяконов, В.В. Папин, Р.В. Безуглов, **Д.В. Добрыднев**, А.С. Шмаков, Д.К. Мельниченко // Кибернетика энергетических систем : сборник материалов XLII Международной научно-технической конференции, г. Новочеркасск, 24-26 ноября 2020 г. / Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова. – Новочеркасск: ЮРГПУ(НПИ), 2020. – С. 287-290.

Учебные пособия

12. Папин, В.В. Повышение эффективности тепловых электрических станций путем применения абсорбции отработавшего пара : учебное пособие / В.В. Папин, Р.В. Безуглов, Е.М. Дьяконов, В.А. Смолий, **Д.В. Добрыднев** // Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова. – Новочеркасск : ЮРГПУ (НПИ), 2022. – 75 с.

ДОБРЫДНЕВ Денис Владимирович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЦИКЛОВ ПАРОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК ЭНЕРГОКОМПЛЕКСОВ
МАЛОЙ МОЩНОСТИ ПУТЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ КОНДЕНСАЦИИ ПАРА НА ЕГО АБСОРБЦИЮ**

АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать 14.04.2025 Формат 60х84 1/16. Печать плоская. Усл. п.л. 1,16. Тираж 100 экз. Заказ № 39

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34. Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ