

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по науке и инновациям
ФГБОУ ВО «Национальный
исследовательский университет «МЭИ»
доктор технических наук
Иван Игоревич Комаров

«26» мая 2025 г.

О Т З Ы В

ведущей организации

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»
на диссертацию **Добрыднева Дениса Владимировича**
«Совершенствование циклов паротурбинных установок энергокомплексов малой мощности путем замещения конденсации пара на его абсорбцию»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 2.4.5 – Энергетические системы и комплексы
(технические науки)

Актуальность темы диссертационной работы.

Современная структура экономики и государственное регулирование требуют от промышленных предприятий постоянных усилий в части повышения энергетической эффективности как отдельных производственных цепочек, так и предприятия в целом. Утилизация сбросной теплоты является одним из наиболее эффективных решений в данном направлении, позволяющее решить задачи, связанные с энергоснабжением предприятия. Актуальность данной проблемы обусловлена ежегодным ростом стоимости электроэнергии и органического топлива, а также снижением надежности энергоснабжения.

В настоящее время для выработки электроэнергии путем утилизации сбросной теплоты применяются, как правило, паротурбинные установки (ПТУ) на базе цикла Ренкина. За счет применения вместо воды органических веществ имеется возможность утилизировать теплоту даже сравнительно низкого потенциала (100-200°C и ниже). В то же время цикл Ренкина, как известно, характеризуется весьма значительными тепловыми потерями, которые могут достигать до 2/3 от всей подведенной теплоты (для установок малой мощности с низкими начальными параметрами пара эта величина может быть еще больше). Вследствие этого поиск способов повышения энергетической эффективности цикла Ренкина (в том числе за счет изменения некоторых процессов) является важной задачей, которая особенно актуальна для установок малой мощности. Решение данной задачи позволит получить как энергетический, так и экономический эффект. По этой причине тема, цель и задачи

диссертационного исследования, посвященного повышению энергетической эффективности циклов паротурбинных установок малой мощности, являются актуальными.

Структура, объем и основное содержание диссертации.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, списка литературы, включающего 210 наименований. Изложена на 250 страницах машинописного текста, содержит 68 рисунков, 54 таблицы и 4 приложения.

Во введении обоснована актуальность темы исследования. Сформулированы цель, задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы. Представлены методы исследования, приведены положения, выносимые на защиту, информация о реализации и апробации результатов работы, личном вкладе и научных публикациях автора, описана структура и объем диссертации.

Первая глава диссертации посвящена анализу имеющихся в промышленности вторичных энергетических ресурсов (ВЭР) и технологий для их полезного использования. Рассмотрены паротурбинные установки с циклом Ренкина, которые применяются для производства электроэнергии за счет утилизации сбросной теплоты. На основе анализа работы и схем применения данных установок (как с водяным паром, так и с органическими веществами) сделан вывод о необходимости повышения их энергетической эффективности. Обзор современных исследований в данном направлении показал, что этого можно достичь за счет применения абсорбция пара. Автором отмечена необходимость в исследовании данного направления для чего были проанализированы основные особенности работы абсорбционных преобразователей теплоты, основные процессы, а также применяемые рабочие тела и ряд их эксплуатационных свойств. С целью повышения эффективности паротурбинных установок малой мощности предложено заменить процесс конденсации отработавшего после турбины пара на процесс абсорбции. Данное решение автор назвал «модернизированным циклом Ренкина» («МЦР»). Был рассмотрен цикл Калины, в котором протекают схожие процессы и проведено сравнение с предложенным автором решением. Сформулированы задачи диссертации.

Во второй главе раскрыта общая концепция «модернизированного цикла». В качестве рабочих тел выбраны водоаммиачный и бромистолитиевый растворы. В главе выполнена разработка схемных решений «МЦР» с учетом свойств применяемых рабочих тел, раскрыты особенности применения данных схем. Описаны основные рабочие процессы и циклы для различных схемных решений. Дополнительно разработаны схемы применения энергокомплексов для утилизации теплоты (в качестве примеров выбраны газопоршневая установка и воздухоподогреватель доменной печи).

Третья глава диссертации посвящена разработке методик термодинамического и эксергетического анализа «модернизированного цикла Ренкина». В главе подробно рассмотрены особенности расчета «МЦР» с учетом аналогичных методик расчета циклов Ренкина и абсорбционных преобразователей теплоты. Отмечены основные сложности, возникающие при «прямом» совмещении данных методик и неточности,

которые могут возникнуть при этом (в частности, сложности при определении концентраций и рабочих давлений в цикле для состояния насыщения чистого аммиака). Термодинамический анализ цикла выполняется на основе материального баланса. На основе материального баланса выполнена также разработка методики эксергетического анализа, проведен общий обзор подходов, используемых при оценке физической и химической эксергии и приведены выражения для оценки эксергетической эффективности основных элементов цикла.

В четвертой главе приведены результаты параметрического анализа «модернизированного цикла», а также «конкурирующих технологий» - цикла Ренкина на воде и органических веществах. Для сравнения четырех рассматриваемых в диссертации циклов автором выполнен расчет при начальной температуре пара 200°C, который включает термодинамический и эксергетический анализы. Результаты расчетов показали более высокую эффективность решения на базе «модернизированного цикла с бромистолитиевым раствором». Также в главе выполнен достаточно подробный анализ влияния различных граничных условий на эффективность и основные характеристики рассматриваемых циклов. Дополнительно рассмотрена эффективность «МЦР» на примере различных энергокомплексов: энергокомплекса с паровой турбиной К-3,0-1,275, а также энергокомплекса для утилизации уходящих газов газопоршневой установки. Также в главе приведена методика расчета основных элементов «МЦР», результаты расчетов приведены в приложении Б.

В пятой главе на примере энергокомплекса с турбиной К-3,0-1,275, выполнено технико-экономическое обоснование применения «МЦР». Описаны методики определения капиталовложений и эксплуатационных затрат. На основании данных методик выполнен расчет основных технико-экономических показателей и проведена оценка срока окупаемости проекта. Результаты показали экономическую целесообразность применения «МЦР» для паротурбинных установок малой мощности (для условий утилизации сбросной теплоты).

В заключении сформулированы основные выводы и результаты диссертационной работы в соответствии с поставленными задачами, указаны перспективные направления дальнейших исследований.

В приложении приведены результаты термодинамического и эксергетического анализа, результаты расчета абсорберов, патенты на изобретения и акт внедрения результатов исследования.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций.

Обоснованность и достоверность представленных в диссертации результатов научного исследования обеспечены применением апробированных методов расчетов, основанных на фундаментальных законах технической термодинамики, теории тепло- и массообмена, обоснованностью принятых в работе допущений, согласованностью

полученных результатов с опубликованными данными других авторов, публикациями результатов исследования в рецензируемых научных изданиях.

Научные положения, выносимые на защиту, раскрыты в тексте диссертации и в опубликованных соискателем работах.

Результаты работы докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях: 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.

Основные теоретические и практические результаты исследования опубликованы в 12 научных работах, в том числе в 4 работах в изданиях, рекомендуемых ВАК при Минобрнауки России, а также в 2 патентах РФ на изобретение.

Опубликованные соискателем научные работы достаточно полно отражают основные результаты диссертационного исследования.

Научная новизна работы заключается в следующем:

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 усовершенствованная методика расчета, предложенного автором «модернизированного цикла Ренкина», функционирующего на водоаммиачном и бромистолитиевом растворах.

Значимость полученных автором диссертации результатов для развития соответствующей отрасли науки.

Теоретическая значимость диссертации заключается в предложенном способе 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 позволяет 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. Разработаны схемные решения по применению «модernизированного цикла Ренкина» для утилизации сбросной теплоты газопоршневых установок и воздухоподогревателей доменных печей, которые могут быть применены и для других источников теплоты.

Рекомендации по использованию результатов и выводов, приведенных в диссертации.

Приведенные в диссертации исследования и разработанные технические решения по повышению эффективности цикла Ренкина рекомендуются к использованию в проектных и научно-исследовательских организациях, занимающихся разработкой и проектированием теплоэнергетического оборудования и систем, а также на производственных и энергетических предприятиях, имеющих источники сбросной теплоты (объекты ПАО «РусГидро», Новочеркасская ГРЭС, тепловые электрические станции, металлургические комбинаты и т.д.). Технические решения паротурбинных установок малой мощности и методика расчета «модernизированного цикла» рекомендуются к использованию в учебном процессе при реализации образовательных программ бакалавриата и магистратуры по направлению «Теплоэнергетика и теплотехника».

Соответствие диссертации научной специальности.

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 2.4.5 «Энергетические системы и комплексы» в части направлений исследований:

– по пункту 1: «Разработка научных основ (подходов) исследования общих свойств ... методов расчета ... показателей качества ... энергетических ... комплексов, ... на органическом ... топлив(е) ...»;

– по пункту 3: «Разработка, исследование ... действующих и освоение новых технологий ... для производства электрической ... энергии, использования органического ... топлив(а) ... способов снижения негативного воздействия на окружающую среду ...»;

– по пункту 5: «Разработки и исследования в области энергосбережения и ресурсосбережения при производстве ... электрической энергии ...».

Замечания и вопросы по содержанию диссертации.

1. При разработке модернизированного цикла рассматриваются два рабочих вещества – водоаммиачный и бромистолитиевый растворы. Чем обоснован выбор данных рабочих тел? Почему не рассматривались другие пары рабочих веществ?

2. В рамках технико-экономического обоснования анализируются паротурбинные установки на базе модернизированного цикла (с бромистолитиевым раствором) и традиционного цикла (с водой), однако не производится анализ органического цикла Ренкина и модернизированного цикла с водоаммиачным раствором. Чем это объясняется? Для установок малой мощности чаще используется именно органический цикл Ренкина.

3. При анализе схемы с водоаммиачным раствором рассматривается схема с дефлегмацией пара, но не анализируется применение схемы с ректификацией. По какой причине данная схема не рассматривается, ведь данное решение характеризуется достаточно высокой эффективностью в части повышения концентрации аммиака?

4. Учитывался ли при расчетах риск кристаллизации бромистолитиевого раствора? Если да, то каким образом?

5. В главе 3 при рассмотрении методики эксергетического анализа описываются подходы по определению химической эксергии, однако в приложении 1 приводится только физическая эксергия. По какой причине?

Заключение по работе

Диссертационная работа Добрыднева Дениса Владимировича на тему «Совершенствование циклов паротурбинных установок энергокомплексов малой мощности путем замещения конденсации пара на его абсорбцию», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.5 «Энергетические системы и комплексы» (технические науки), является завершенной научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные технические решения, имеющие важное значение для развития энергетической отрасли страны.

Содержание диссертационной работы соответствует паспорту специальности 2.4.5 «Энергетические системы и комплексы» (технические науки). Результаты диссертационного исследования апробированы на научно-технических конференциях и опубликованы в журналах из перечня ВАК Минобрнауки РФ.

Диссертация «Совершенствование циклов паротурбинных установок энергокомплексов малой мощности путем замещения конденсации пара на его абсорбцию» соответствует требованиям, предъявляемым ВАК Минобрнауки РФ, установленным в п.п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г. (в актуальной редакции), а ее автор, Добрыдnev Денис Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.5 – «Энергетические системы и комплексы» (технические науки).

Диссертация Добрыднева Д.В., автореферат и отзыв ведущей организации обсуждены и одобрены на заседании кафедры промышленных теплоэнергетических систем ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», протокол №06/25 от 22.05.2025 г.

Заведующий кафедрой
промышленных теплоэнергетических систем
ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ»,
кандидат технических наук, доцент

М

Яворовский Юрий Викторович

Профессор кафедры
промышленных теплоэнергетических систем
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»,
доктор технических наук, доцент

Гашо Евгений Геннадьевич

Сведения о ведущей организации:
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»)

Адрес: 111250, Россия, г. Москва, вн. тер. г. муниципальный округ Лефортово, ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1

Телефон: +7 495 362-70-01, +7 495 362-89-38

Адрес электронной почты: universe@mpei.ac.ru

Официальный сайт организации: www.mpei.ru

Подпись Яворовского Юрия Викторовича и Гашо Евгения Геннадьевича заверяю.

Подпись _____
удостоверяю
начальник управления
работе с персоналом

Гав

