

ОТЗЫВ

**официального оппонента Углова Дмитрия Александровича
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)**

1. Актуальность темы диссертации.

Повышение энергетической эффективности различных технологических систем (и установок) традиционно относится к основным мероприятиям в части развития и модернизации любого промышленного предприятия. Потребность в подобных мероприятиях обусловлена рядом как чисто технических (в частности, снижение расхода топлива или теплоносителя, уменьшение потерь энергоресурсов или теплоты), так и экономических факторов (например, уменьшение затрат на покупку топлива и электроэнергии, снижение себестоимости производимой продукции). Одним из наиболее универсальных и рентабельных мероприятий подобного рода была и остается утилизация сбросной теплоты и ее использование в качестве теплового источника при выработке электроэнергии.

На сегодняшний день на предприятиях достаточно распространенной является ситуация, при которой утилизируется только сбросная теплота высокого потенциала, в то время как теплота среднего и низкого потенциала – сбрасывается в окружающую среду и никаким образом не используется. Это можно объяснить тем, что решения в части утилизации теплоты низкого потенциала (малой мощности) часто характеризуются достаточно низкой рентабельностью и эффективностью (в сравнении с системами большой мощности), что является весьма актуальной проблемой и в существенной степени ограничивает их распространение. Характерным примером могут выступать широко распространенные паротурбинные установки (ПТУ) с циклом Ренкина, эффективность и мощность которых существенно снижается в условиях утилизации теплоты низкого и среднего потенциала. Применяемые для установок большой мощности решения, например, усложнение схемы, в этих условиях достаточно часто бывает ограничено по причине роста стоимости установки или особенностей ее работы. Решением может выступать поиск новых подходов, обеспечивающих повышение эффективности именно ПТУ малой мощности, которые работают с тепловыми источниками среднего

и низкого потенциала, например, модернизация непосредственно цикла работы ПТУ малой мощности. Исследования в данном направлении являются актуальными с учетом значительного распространения малых ПТУ.

Целью диссертационной работы Добрыднева Д.В. является повышение эффективности ПТУ малой мощности на базе цикла Ренкина, работающих в условиях утилизации теплоты низкого и среднего потенциала (диапазон температур пара перед турбиной 100-300°C), путем замещения конденсации отработавшего после турбины пара на процесс его абсорбции.

2. Структура, объем и содержание диссертации.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, списка используемой литературы, включающего 210 наименований, а также четырех приложений. Общий объем диссертационной работы включает 260 страниц машинописного текста, 68 рисунков и 54 таблицы.

Во введении обоснована актуальность темы. Представлены общие сведения о степени разработанности темы диссертации, определена цель и сформулированы задачи исследования. Указана научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы. Представлены положения, выносимые на защиту, приведены методология и методы исследования, обоснована степень достоверности полученных результатов, указана информация об апробации результатов работы, личном вкладе и научных публикациях автора.

В первой главе автор на основании литературного обзора рассматривает имеющиеся в промышленности и энергетике вторичные энергетические ресурсы (ВЭР), делая акцент на тепловых ВЭР, которые могут использоваться в качестве источников теплоты при выработке электроэнергии. Дополнительно рассматриваются особенности цикла Ренкина как основной технологии, обеспечивающей выработку электроэнергии за счет утилизации сбросной теплоты. Уделено внимание вопросам применения паротурбинных установок (ПТУ) малой мощности для утилизации сбросной теплоты, рассмотрены отечественные производители малых ПТУ, проанализированы рабочие тела и недостатки, характерные циклу Ренкина и малым ПТУ в условиях утилизации теплоты низкого и среднего потенциала. Автором отмечена необходимость в совершенствовании циклов ПТУ малой мощности за счет использования альтернативных подходов, включающих не только применение различных схемных решений и оптимизацию параметров, но также изменение непосредственно процессов, протекающих в цикле Ренкина. В частности, предлагается усовершенствовать цикл Ренкина малых ПТУ путем применения процесса абсорбции отработавшего после турбины пара (вместо его

конденсации). С этой целью были проанализированы физические основы процесса абсорбции, рабочие растворы, применяемые в абсорбционных преобразователях теплоты (АПТ), а также рассмотрен цикл Калины, в котором в качестве рабочего тела применяется водоаммиачная смесь. На основе проведенного обзора, автором определено направление диссертационного исследования, сформулирована цель, а также задачи, направленные на достижение поставленной цели.

Вторая глава диссертации посвящена разработке модернизированного цикла Ренкина (цикла Ренкина с абсорбцией отработавшего после турбины пара), описанию основных его особенностей и процессов. Автором выделяется два варианта модернизированного цикла – с водоаммиачным и бромистолитиевым растворами. Оба варианта модернизированного цикла имеют свои особенности, обусловленные свойствами рабочих веществ, которые подробно проанализированы в первой главе. Также в главе выполнена разработка оптимизированных схемных решений, в частности, схем с регенерацией теплоты растворов и регенерацией теплоты рабочего тела, схемы с дефлегмацией. Для каждой схемы приведены диаграммы и описание основных процессов. Автором отмечается, что схема с регенерацией теплоты растворов (схема с регенерацией теплоты в «термохимическом насосе») является наиболее эффективной и поэтому для дальнейших исследований применяется именно данное решение.

В третьей главе диссертации на основании положений, сформулированных в главе 2, автором выполнена разработка методики расчета модернизированного цикла. Разработка методики выполнена отдельно для водоаммиачного и бромистолитиевого растворов, что вызвано отличием в их свойствах и ведет, в частности, к различным подходам при определении параметров «термохимического насоса» (контура абсорбер-питательный насос-генератор пара-дрессельное устройство) и расчете концентрации рабочего тела. Дополнительно разработана методика эксергетического анализа модернизированного цикла, для которой характерны особенности аналогичных методик как АПТ, так и традиционного цикла Ренкина.

В четвертой главе приводятся результаты параметрического анализа модернизированного цикла, а также сравнение показателей последнего с показателями традиционных решений – цикла Ренкина с водой и с органическими веществами в качестве рабочих тел. В частности, было проанализировано влияние на основные показатели рассматриваемых циклов следующих параметров – начальная температура и давление пара, температура охлаждающего источника, внутренний относительный КПД турбины, параметры «термохимического насоса». Автором выполнен анализ

полученных результатов и зависимостей, а также обоснованы основные ограничения, характерные для модернизированного цикла (в частности, увеличение конечной влажности пара в цикле с бромистолитиевым раствором, снижение интервала дегазации в ряде условий). Соискателем выявлено, что в диапазоне сравнительно низких температур греющего источника теплоты, которым соответствуют начальные температуры пара 100-200°C, наиболее оптимальным решением является модернизированный цикл с водоаммиачным раствором. Это обусловлено тем обстоятельством, что аммиак является низкокипящим рабочим телом, позволяющим утилизировать теплоту низкого потенциала. При более высоких температурах источника целесообразно использовать модернизированный цикл с бромистолитиевым раствором. Также в рамках главы 4 были рассчитаны основные показатели энергокомплексов для утилизации теплоты уходящих газов газопоршневой установки, выполненных на базе традиционного цикла Ренкина с водой и модернизированного цикла Ренкина с бромистолитиевым раствором. Выбор обоснован наивысшими значениями КПД и электрической мощности данных решений.

Пятая глава посвящена технико-экономической оценке использования модернизированного цикла Ренкина в энергокомплексе для утилизации сбросной теплоты. Расчет произведен на примере установки с паровой турбиной К-3,0-1,275 (термодинамический анализ произведен в главе 4). Результаты расчетов показали, что реализация установки на базе модернизированного цикла требует применения дополнительного оборудования (теплообменника растворов, расширительного клапана) и более дорогостоящего рабочего тела (водного раствора бромида лития), что ведет наряду более сложной схемой ведет к повышению капиталовложений в ПТУ на 10,6%. Тем не менее, за счет большей электрической мощности имеет место значительный рост в части выработки электроэнергии для данного решения и, как следствие, экономическая целесообразность его применения.

В заключении сформулированы основные выводы и результаты диссертации в соответствии с целью исследования и поставленными задачами. Указаны направления дальнейших исследований по теме диссертационной работы.

В приложении представлены патенты на изобретения, акты внедрения, а также результаты расчетов.

3. Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем: предложен способ повышения эффективности цикла Ренкина паротурбинных установок малой мощности за счет применения процесса

абсорбции (вместо его конденсации) путем совмещения цикла Ренкина и цикла абсорбционного преобразователя теплоты (модернизированный цикл Ренкина – МЦР); выявлено, что в диапазоне температур пара перед турбиной 200-300°C модернизированный цикл с бромистолитиевым раствором обеспечивает прирост термического КПД 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 прирост КПД; выявлено, что в диапазоне температур пара перед турбиной 100-200°C модернизированный цикл с водоаммиачным раствором обеспечивает увеличение термического КПД в сравнении с органическим циклом Ренкина с рабочим телом R142b в среднем на 11,3-21,5%, причем чем выше начальная температура пара, тем больше прирост КПД; разработана методика расчета модернизированного цикла с летучим и нелетучим рабочим телом (водоаммиачным и бромистолитиевыми растворами соответственно), учитывающая их свойства и особенности работы контура абсорбер-генератор пара.

4. Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Обоснованность и достоверность результатов диссертационного исследования подтверждается использованием 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.

5. Теоретическая и практическая значимость полученных автором результатов.

Теоретическая значимость полученных результатов диссертационной работы заключается в разработке способа повышения эффективности цикла Ренкина, путем применения процесса абсорбции и двухкомпонентных рабочих тел, а также в разработке методики расчета цикла Ренкина с абсорбцией пара (модернизированного цикла Ренкина) и оценке его эффективности путем выполнения параметрического анализа.

Практическая значимость полученных результатов диссертационной работы заключается в разработке технических решений, которые позволяют повысить эффективность паротурбинных установок малой мощности, работающих в условиях температур пара перед турбиной 100-300°C и

обеспечивающих утилизацию тепловых ВЭР в энергетике и промышленности, а также в разработке схемных решений модернизированного цикла и разработке вариантов его применения в энергетике и промышленности. Указанное подтверждается полученными автором патентами на изобретение №2759583 и №2787622, а также актами внедрения от «РусГидро», Новочеркасской ГРЭС и ЮРГПУ(НПИ).

6. Публикация основных результатов диссертационной работы.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях, а также изложены в 12 печатных работах, в том числе в 4 работах в изданиях, рекомендуемых ВАК при Минобрнауки России, 5 работах в материалах международных и отечественных конференций, 2 патентах РФ на изобретение, 1 учебном пособии.

Автореферат соответствует содержанию диссертации.

7. Соответствие диссертации и автореферата паспорту научной специальности 2.4.5 – Энергетические системы и комплексы.

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 2.4.5 – Энергетические системы и комплексы: 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 ...».

8. Замечания и вопросы по диссертационной работе.

1. Из диссертации непонятно проведена ли оценка выбранных рабочих веществ с точки зрения влияния на экологию? Обладают ли они преимуществами в сравнении с основными конкурирующими технологиями (цикл Ренкина с водой и органическими веществами)? Необходимо ли ввести в методику оценки эффективности предлагаемых систем комплексный показатель экологичности энергетического комплекса, включающий в себя и затраты энергии на их утилизацию?

2. Автором упоминается возможность применения поверхностно активных веществ (ПАВ) для интенсификации процессов тепломассопереноса

в основном оборудовании модернизированного цикла (с. 50)? Какие вещества применяются для этой цели?

3. Какие факторы могут влиять на интенсивность капельного уноса в случае с бромистолитиевым раствором?

4. Оценивалась ли возможность применения модернизированного цикла для турбин других типов, например, для теплофикационных или пульсационных?

5. В главе 4.2.8 выполнен расчет электрической мощности паротурбинных установок на базе традиционного и модернизированного циклов Ренкина. В последнем случае рассмотрен только бромистолитиевый раствор. По какой причине в данном сравнении не оценивались водоаммиачный раствор или органический цикл Ренкина?

6. Оценивалось ли влияние ставки доходности на срок окупаемости инвестиций (принятое значение составляет 19%)? Каким оно может быть?

7. В $T-s$ диаграммах модернизированного цикла с бромистолитиевым раствором (с. 83, 86) в отличие от аналогичных диаграмм для водоаммиачного раствора не приводятся кривые насыщения для водного раствора бромида лития. Чем это обосновано?

9. Заключение.

Указанные замечания имеют рекомендательный характер и не снижают научную ценность и практическую значимость диссертационной работы.

Диссертация 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 самостоятельной завершенной научно-квалификационной работой, в которой разработаны новые научно обоснованные технические решения, обеспечивающие повышение энергетической эффективности паротурбинных установок малой мощности и имеющие важное значение для развития и эффективной работы энергетического комплекса страны.

Диссертационная работа «Совершенствование циклов паротурбинных установок энергокомплексов малой мощности путем замещения конденсации пара на его абсорбцию» соответствует требованиям пп. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г. (в актуальной редакции), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Добрыдnev Денис Владимирович, заслуживает

присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.5 – «Энергетические системы и комплексы» (технические науки).

Официальный оппонент:

Профессор кафедры «Теплотехника
и тепловые двигатели» федерального
государственного автономного
образовательного учреждения
высшего образования
«Самарский национальный
исследовательский университет
имени академика С.П. Королева»
доктор технических наук, доцент

Угланов Дмитрий
Александрович

«23» 05 2025 г.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Самарский национальный исследовательский
университет имени академика С.П. Королева».

Адрес организации: 443086, Приволжский федеральный округ, Самарская
область, г. Самара, Московское шоссе, д. 34.

Телефон: +7 (846) 335-18-26.

Адрес электронной почты: ssau@ssau.ru.

Официальный сайт организации: [https://](https://ssau.ru/) <https://ssau.ru/>

