

## **ОТЗЫВ**

### **официального оппонента**

доктора технических наук, профессора Мильмана Олега Ошеревича на диссертационную работу Шкарина Кирилла Владимировича «Повышение эффективности газотурбинных установок путём использования вторичных энергоресурсов», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.7. Турбомашины и поршневые двигатели в диссертационный совет ПДС 2022.013 при ФГАОУ ВО «РУДН»

#### **1. Актуальность темы диссертации.**

Основные тенденции развития современных газотурбинных установок направлены на повышение их энергетических и экологических показателей. В связи с этим перспективным направлением повышения эффективности работы газотурбинных установок и других тепловых двигателей является использование вторичных энергоресурсов, основанное на применении тепловых насосов, реализующее возможность утилизации различных источников низкопотенциальной тепловой энергии.

Необходимость перехода от используемых традиционных источников тепло- и электроснабжения к более современным энергосберегающим установкам определена энергетической стратегией Российской Федерации. Наиболее перспективными могут быть когенерационные установки, работающие совместно с тепловыми насосами.

Использование многоступенчатых теплонасосных установок с промежуточным отбором хладагента по ступеням помогает достичь высокого коэффициента преобразования в требуемых температурных интервалах и увеличить коэффициент использования тепла топлива.

Тема разработки метода расчёта, а также проведение и анализ экспериментальных исследований многоступенчатой тепловой насосной установки с промежуточным отбором рабочего тела по ступеням является **актуальной.**

## **2. Достоверность и новизна результатов диссертации.**

Достоверность основных положений диссертации обусловлена:

- корректным применением соискателем поставленной задачи классической теории термодинамики, теории теплообмена, применением численных методов;
- экспериментальным исследованием трехступенчатой теплонасосной установки, которое было выполнено автором с использованием разработанного им стенда;
- соответствием расчетных и экспериментальных данных по коэффициенту преобразования теплонасосной установки;
- выполненной автором оценки погрешности эксперимента и верификацией метода расчета и определения коэффициента преобразования многоступенчатой тепловой насосной установки с промежуточным частичным отбором рабочего тела по ступеням; обсуждением результатов выполненных исследований на научно-технических конференциях и семинарах.

**Научная новизна** работы заключается в:

- разработанном автором научно обоснованном методе расчёта многоступенчатой тепловой насосной установки с промежуточным отбором рабочего тела по ступеням и определении её коэффициента преобразования;
- определении оптимальных расходов рабочего тела по ступеням тепловой насосной установки на основе зависимостей, полученных по результатам экспериментальных данных;
- обосновании оптимального количества ступеней тепловой насосной установки в требуемых границах температур на различных режимах работы с последующей экспериментальной верификацией на разработанном автором испытательном стенде.

## **3. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.**

Степень обоснованности и достоверности научных положений, а также выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации Шкарина К.В., подтверждается:

- корректной постановкой цели и задач исследования. Обоснованным применением современных апробированных методов их решения;

- анализом широкого круга литературных источников, содержащих исследования отечественных и зарубежных авторов по рассматриваемой проблеме;

- экспериментальным подтверждением расчетных методов применительно к многоступенчатым теплонасосным установкам.

#### **4. Ценность для науки и практики результатов работы.**

Научную ценность представляет разработанный соискателем анализ работы многоступенчатой тепловой насосной установки с промежуточным отбором рабочего тела по ступеням и определение её коэффициента преобразования.

Практическая ценность результатов работы соискателя состоит в разработанной автором методике расчёта и проектирования многоступенчатой тепловой насосной установки с отбором рабочего тела по ступеням и программном обеспечении в среде графического программирования SCADA ZETVIEW, которое автоматизирует и ускоряет процесс подготовки исходных данных.

#### **5. Подтверждение опубликования основных результатов диссертации в научной печати.**

Основные положения диссертации Шкарина К.В., в необходимом объеме, изложены в 16 научных изданиях, из которых одна работа опубликована в рецензируемых изданиях из Перечня ВАК РФ, три работы опубликованы в изданиях, рецензируемых в международной базе цитирования Scopus, пять работ опубликовано в изданиях из Перечня РУДН, получены 4 патента на изобретения. Результаты диссертационного исследования неоднократно проходили апробацию на всероссийских и международных конференциях.

#### **6. Соответствие содержания автореферата основным положениям диссертации.**

Содержание автореферата, объемом 23 страницы, в полной мере отображает содержание, научные результаты и выводы диссертации.

## **7. Структура диссертации и оценка ее содержания**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, списка литературы. Объем диссертации составляет 141 страницу, содержит 20 таблиц и 50 рисунков, список литературы содержит 113 работ отечественных и зарубежных авторов.

**Во введении** соискателем приведено обоснование актуальности темы выбранного направления исследования. Сформулированы положения научной новизны, теоретической и практической значимости исследования. Определены методология и методы исследования, а также научные положения, которые обуславливают степень достоверности полученных результатов.

**В первой главе** автором выполнен анализ отечественного и зарубежного опыта по рассматриваемой проблеме. Обозначены известные подходы и способы повышения эффективности газотурбинных установок с использованием вторичных энергоресурсов различными методами. Рассмотрено применение тепловых насосов в различных утилизационных схемах с газотурбинными установками, в том числе и когенерационных. Показана целесообразность использования утилизационных установок с тепловыми насосами, приводимых газотурбинными двигателями и являющихся экономически более эффективными, чем применение газовых котельных.

**Во второй главе** соискателем приводится анализ различных термодинамических циклов тепловых насосов, где оптимальным решением применительно к поставленной задаче определяется приближение к циклу Лоренца.

Далее автором представлена методика расчета компрессорной многоступенчатой теплонасосной установки. На основании приведенной методики определяется влияние количества ступеней теплового насоса на коэффициент преобразования при изменении разницы температур между низкопотенциальным и высокопотенциальным источниками теплоты.

Определяется относительный прирост коэффициента преобразования теплового насоса в зависимости от количества ступеней, где основной прирост в исследуемом температурном интервале приходится на двухступенчатый.

**В третьей главе** соискатель обосновывает выбор типа и основных параметров газотурбинной установки для привода теплового насоса. Показано расчетное увеличение коэффициента использования теплоты топлива при различных коэффициентах преобразования теплового насоса с приводом от газотурбинной установки.

Рассматривается утилизация теплоты вторичных энергоресурсов с использованием многоступенчатой теплонасосной установки с различными вариантами количества ступеней на примере замкнутого контура охлаждения оборудования энергоблока ПГУ-420Т с оценкой эффективности различных вариантов. Система замкнутого контура охлаждения отводит все тепло через теплообменники в систему циркуляционного водоснабжения с последующей утилизацией через градирню в окружающую среду. Использование вторичных энергоресурсов от дымовых газов, в силу обозначенных рисков, не рассматривалось.

**В четвертой главе** приводится описание созданной автором экспериментальной исследовательской трёхступенчатой теплонасосной установки с возможностью контроля и визуализации процесса частичного отбора рабочего тела по ступеням в фазоразделителях.

В системе контроля и управления экспериментальной установки автор использовал современное программное обеспечение ZetLAB и SCADA ZETVIEW.

Это позволило создать измерительный комплекс мониторинга и управления испытательного стенда, осуществлять контроль работы установки в реальном времени и непрерывную фиксацию всех параметров.

Экспериментальными исследованиями работы трехступенчатой тепловой насосной установки с частичным отбором рабочего тела по ступеням на различных режимах были подтверждены теоретически полученные зависимости

коэффициента преобразования от разности температур потребителя и низкопотенциального источника.

#### **8. Замечания по работе.**

1. Глава 1 и глава 2: не усматриваю разницу в определении коэффициента трансформации  $\mu$  и COP (coefficient of performans). Это вносит элемент неопределенности в текст диссертации.

2. Глава 2 формулы (2.5) – (2.19) – основы термодинамики из учебника; в диссертации это лишнее.

3. Глава 2. Идея создания рабочего тела, приближающаяся термодинамический цикл холодильной установки к циклу Лоренца, представляется принципиально не осуществимой в реальном цикле.

4. Расчет подогрева сетевой воды тепловыми насосами от температуры 32.6 до 75°C – очень нетипичная ситуация. Обратная сетевая вода имеет температуру не ниже 50°C по условиям горячего водоснабжения. Это повлияет на оценку экономического эффекта.

5. Расчет погрешности не вполне понятен: удобнее было бы использование относительной среднеквадратичной ошибкой для случая распределения Гаусса. Из диссертации не понятно, какой статус погрешности, рассчитанный в диссертации, и какой доверительный интервал значений экспериментальных данных можно оценить вероятностными оценками.

6. В описании системы измерений в экспериментальной части нет ссылки на поверку средств измерений.

7. В переохладителе трехступенчатой ТНУ, приведенном на рис. 4.3, нет четкой организации потока нагреваемой среды.

8. В приведенной методике расчета не указаны потери давления паров хладагента в проточной части теплообменных аппаратов.

Указанные замечания не снижают ценности работы, диссертация представляет собой законченное исследование, а ее результаты обладают научной новизной и практической ценностью.

#### **9. Соответствие диссертации паспорту научной специальности**

Содержание диссертации соответствует заявленной области исследований и следующим пунктам паспорта научной специальности 2.4.7. Турбомашины и поршневые двигатели:

2 – Разработка физико-математических моделей, пакетов прикладных программ, цифровых двойников, методов экспериментальных исследований, теоретические и экспериментальные исследования с целью повышения эффективности, надежности и экологичности рабочих процессов турбомашин, поршневых двигателей, их систем и вспомогательного оборудования в составе объектов применения;

3 – Экспериментальные исследования и физико-математическое моделирование динамики, напряженно-деформированного состояния, прочности и разрушения материалов, узлов и механизмов, их надежности, режимов работы турбомашин, поршневых двигателей, их систем и вспомогательного оборудования.

## **10. Заключение**

Диссертационная работа Шкарина Кирилла Владимировича «Повышение эффективности газотурбинных установок путём использования вторичных энергоресурсов» является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится новое решение научной задачи, имеющей важное значение для турбомашиностроения. Работа Шкарина К.В. соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, согласно п.2.2 раздела II Положения о присуждении ученых степеней в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы», утвержденного Ученым советом РУДН протокол № УС-12 от 03.07.2023г., а её автор, Шкарин Кирилл Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.7. Турбомашины и поршневые двигатели.

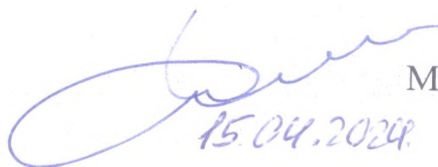
Отзыв составил профессор кафедры физики и математики Физико-технологического института ФГБОУ ВО «Калужский государственный

университет им. К.Э. Циолковского» д.т.н. (05.04.00), профессор Мильман Олег Ошеревич.

Официальный оппонент

Мильман Олег Ошеревич

Справочные данные:

  
15.04.2024

Мильман Олег Ошеревич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры физики и математики Физико-технологического института ФГБОУ ВО «Калужский государственный университет им. К.Э. Циолковского», лауреат государственной премии и премии Правительства РФ, премии им. И.И. Ползунова АН СССР, заслуженный деятель науки и техники РФ, Калужская обл., г. Калуга, ул. Степана Разина, д. 26.

Тел. 8-953-433-63-56 e-mail: [turboson@turbosonkaluga.ru](mailto:turboson@turbosonkaluga.ru)

Подпись Мильмана О.О. заверяю:



*Согласен по содержанию*  
*Фролов Г.А.*

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Калужский государственный университет им. К.Э. Циолковского», Калужская обл., г. Калуга, ул. Степана Разина, д. 26.