

## ОТЗЫВ

### официального оппонента

кандидата технических наук, Борисова Юрия Александровича 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.**

Известно, что оптимальное использование вторичных энергоресурсов газотурбинных установок, которые составляют основную часть тепловых выбросов современных энергоблоков, является необходимым условием повышения их эффективности.

Растущие требования к экологичности отработавших газов и снижению удельных расхода топлива ставит важную задачу по созданию новых энергогенерирующих установок с использованием современных энергосберегающих технологий. Внедрение теплонасосных установок для утилизации сбрасываемой низкопотенциальной теплоты энергоблоков, позволяющих рационально утилизировать вторичные энергоресурсы, могут помочь в решении этой задачи.

Достичь высокого коэффициента преобразования в требуемых температурных границах возможно при использовании многоступенчатых теплонасосных установок с промежуточным отбором хладагента по ступеням, что, в свою очередь, позволит увеличить коэффициент использования тепла топлива.

Таким образом, работу Шкарина Кирилла Владимировича, посвященную разработке метода расчёта многоступенчатой тепловой насосной установки с верификацией на созданном испытательном стенде, следует считать **актуальной**.

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

Достоверность результатов диссертации обусловлена:

- корректной постановкой задач, использованием классической теории термодинамики, теории теплообмена;

- совпадением расчетных и экспериментальных данных коэффициента преобразования теплонасосной установки.

**Научная новизна** работы заключается в:

- в разработке научно обоснованного метода расчёта многоступенчатой тепловой насосной установки с промежуточным отбором рабочего тела по ступеням, позволяющего, в том числе, достаточно точно определять коэффициент преобразования;

- обосновании определения оптимального количества ступеней тепловой насосной установки для различных температурных интервалов и режимов работы с последующей экспериментальной верификацией на разработанном испытательном стенде.

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

Проведенные автором исследования основываются на апробированных методах решения корректно поставленной цели и задач.

Достоверность выполненных исследований обеспечивается за счет верификации используемого метода расчёта многоступенчатой тепловой насосной установки с промежуточным отбором рабочего тела по ступеням, а также качественным совпадением результатов определения коэффициента преобразования с экспериментальными значениями.

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

Ценность результатов работы для науки состоит в:

- разработанном методе расчёта многоступенчатой тепловой насосной установки с промежуточным отбором рабочего тела по ступеням, в котором для определения параметров основных элементов и оптимальных расходов рабочего тела для каждой ступени использовался расчетно-экспериментальный метод, предложенный автором.

- оценке влияния количества ступеней на коэффициент преобразования тепловой насосной установки при изменении разницы температур между низкопотенциальным и высокопотенциальным источниками теплоты;

- количественном определении повышения эффективности использования первичного топлива при выработке электрической и тепловой энергии на основе использования многоступенчатых теплонасосных установок в утилизационных схемах.

Ценность результатов работы для практики состоит в разработанном испытательном стенде с экспериментальной исследовательской установкой, используя который, автор выполнил верификацию метода расчёта многоступенчатой тепловой насосной установки, в разработанной многоступенчатой теплонасосной установке защищенной патентом на изобретение №2705696, а также программном обеспечении, разработанном для подготовки исходных данных, необходимых для определения коэффициента преобразования.

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

Результаты диссертационного исследования, в необходимом объеме, отражены в 16 научных изданиях, из которых: 1 работа опубликована в рецензируемых изданиях из Перечня ВАК РФ; 3 работы опубликованы в изданиях международной базы цитирования Scopus; 5 работ опубликовано в изданиях из перечня РУДН; получены 4 патента на изобретения. А также, неоднократно были представлены 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** автором обоснована актуальность работы, сформулированы цель, задачи, научная новизна и практическая значимость проведенного исследования.

**В первой главе** выполнен обзор работ отечественных и зарубежных исследователей, проведен анализ известных подходов и способов повышения эффективности газотурбинных установок различными методами, включая утилизацию вторичных энергоресурсов.

Определены основные подходы к использованию вторичной теплоты тепловых двигателей. Особое внимание автором уделено работе газотурбинных двигателей совместно с тепловыми насосами.

Выполнен анализ энергоэффективности утилизации теплоты и температуры турбоустановок, на основании которого сформулированы особенности, которые необходимо учесть при использовании теплонасосных установок. Проведён обзор основных хладагентов.

Исходя из проведенного анализа определена цель диссертационной работы и направленные на ее достижение задачи.

**Вторая глава** посвящена анализу использования различных перспективных термодинамических циклов тепловых насосов, здесь же приводится схема и методика расчёта компрессионной многоступенчатой теплонасосной установки и тепловой расчёт.

На основании расчета автором определяется влияние количества ступеней теплового насоса на коэффициент преобразования при изменении разницы температур между низкопотенциальным и высокопотенциальным источниками теплоты и формулируется вывод о том, что максимальный «прирост» коэффициента преобразования достигается при переходе от одноступенчатого ТН к двухступенчатому.

**Третья глава** посвящена разработке различных схем, выбора типа и основных параметров когенерационных газотурбинных установок для привода теплового насоса.

Автор представил расчетное увеличение коэффициента использования теплоты топлива при различных коэффициентах преобразования теплового насоса с приводом от газотурбинной установки. Рассмотрена утилизация теплоты вторичных энергоресурсов с использованием многоступенчатой теплонасосной установки с различными вариантами количества ступеней на примере энергоблока ПГУ-420Т с оценкой её эффективности. В качестве рабочего тела теплонасосной установки для сравнения результатов расчета автор использовал хладагент R600a, применяющийся и в экспериментальном стенде.

**В четвертой главе** автором представлены разработанная оптимальная принципиальная схема трехступенчатого теплового насоса и упрощенная схема экспериментальной установки.

Представлена созданная автором экспериментальная исследовательская трехступенчатая теплонасосная установка с промежуточным отбором хладагента по ступеням, оснащенная системой контроля и управления с использованием программного обеспечения ZetLAB и средой графического программирования SCADA ZetVIEW, в которой был спроектирован измерительный комплекс мониторинга и управления для испытательного стенда. Это позволило осуществлять контроль работы в реальном времени и постоянную запись всех параметров экспериментальной установки.

Были выполнены экспериментальные исследования трехступенчатой тепловой насосной установки с частичным отбором рабочего тела по ступеням на различных режимах.

В результате проведенных исследований были экспериментально определены зависимости коэффициента преобразования многоступенчатой теплонасосной установки с промежуточным отбором рабочего тела по ступеням от разности температур потребителя и низкопотенциального источника теплоты,

которые показали хорошее совпадение с расчётными (полученными также автором).

### **8. Замечания по работе.**

1. При оценке эффективности утилизация теплоты вторичных энергоресурсов с использованием многоступенчатой теплонасосной установки на примере энергоблока ПГУ-420Т в качестве рабочего тела не рассмотрены другие перспективные хладагенты, такие как R142В;

2. В работе автором не представлено оценки увеличения габаритов и стоимости, приходящихся на каждую новую ступень теплонасосной установки;

3. В тексте диссертации не обосновано утверждение о влиянии отсутствия каналов охлаждающего воздуха в лопатках турбины на низкий КПД газовых турбин малой мощности;

4. На рисунке 4.1 в оптимальной принципиальной схеме трехступенчатого теплового насоса указано неправильное направление циркуляции нагреваемой воды.

В целом, несмотря на указанные недостатки, работа 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

Диссертационное исследование Шкарина Кирилла Владимировича «Повышение эффективности газотурбинных установок путём использования вторичных энергоресурсов» является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится новое решение научной задачи кандидатской диссертации, имеющей важное значение для повышения эффективности турбомашин. Работа 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. Турбомашин и поршневые двигатели.

Официальный оппонент,

Заведующий лабораторией №10.1 «Газотурбинных технологий»

ФГБУН «Объединенный институт высоких температур Российской академии наук», к.т.н. (05.04.06)

  
17.09.2024.  
Юрий Александрович Борисов

Подпись Ю.А. Борисова заверяю.

Ученый секретарь Ученого совета ОИВТ РАН, д.ф.м.н.





Киверин А.Д.

### Справочные данные:

Борисов Юрий Александрович, кандидат технических наук,  
Заведующий лабораторией №10.1 «Газотурбинных технологий» ФГБУН «Объединенный институт высоких температур Российской академии наук» (ОИВТ РАН),  
г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2,  
Тел. 8-903-500-14-01; e-mail: boricovyu@gmail.com