



ТОЛЬЯТТИНСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ



МИНОБРНАУКИ РОССИИ

федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»  
(ТГУ)

ОКПО 55914968  
ОГРН 1036300997567  
ИНН 6320013673  
КПП 632401001

Белорусская ул., 14, г. Тольятти,  
Самарская обл., 445020  
Телефоны: (8482) 44-94-44, 44-94-24  
Факс (8482) 37-85-89  
E-mail: [office@tltsu.ru](mailto:office@tltsu.ru)  
<https://www.tltsu.ru>

02.11.2023

№ 034129  
на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Председателю диссертационного  
совета 24.2.379.10, созданного  
на базе федерального  
государственного автономного  
образовательного учреждения  
высшего образования «Самарский  
национальный исследовательский  
университет имени академика  
С. П. Королева»  
академику РАН,  
д.т.н., профессору Шахматову Е. В.  
443086. Г. Самара, Московское  
шоссе, 34

## ОТЗЫВ

официального оппонента, д.т.н. Шайкина Александра Петровича,  
на диссертационную работу Тремкиной Ольги Витальевны  
«Совершенствование метода определения характеристик  
низкотемпературных энергоустановок летательных аппаратов»,  
представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук  
по специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и  
энергоустановки летательных аппаратов

### Общая характеристика работы

Целью диссертационной работы Тремкиной О.В. является повышение  
точности проектировочных расчётов низкотемпературных энергоустановок  
(НЭУ) летательных аппаратов (ЛА) за счёт совершенствования метода  
определения характеристик НЭУ, использующих низкопотенциальное тепло  
криопродукта, основанного на обобщении, систематизации, структурном  
анализе и верификации данных. Для решения поставленной цели были  
решены задачи совершенствования метода определения характеристик НЭУ  
ЛА путём совершенствования математических моделей с учётом их состава,  
структуры и параметрических характеристик, расширения диапазона  
применения, уточнения методики определения характеристик цикла и  
методики комплексного проектирования НЭУ ЛА, численного  
моделирования процессов и верификации результатов по параметрам и  
характеристикам НЭУ ЛА.

Входящий № 206-849  
Дата 08 НОЯ 2023  
Самарский университет



## Актуальность темы исследования

Разработка и усовершенствование метода определения характеристик НЭУ, использующих низкопотенциальное тепло криопродукта, является весьма актуальной задачей развития авиационной и космической техники.

Современные тенденции развития требуют применения в космических ЛА как высококипящих, так и криогенных рабочих тел. Водород и кислород в криогенно-жидком состоянии могут использоваться как в основной, так и во вспомогательных энергоустановках ЛА. Кроме того, на борту ЛА могут находиться азот, гелий и другие рабочие тела в различных фазовых и температурных состояниях. Хранение криогенных рабочих тел в сжиженном состоянии является более выгодным для космических условий в связи с тем, что это требует сравнительно низких уровней давления в ёмкости и, соответственно, снижает массу таких ёмкостей.

## Структура диссертации

Диссертационная работа имеет четкую структуру и состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы, включающего в себя 86 наименований. Общий объем работы 178 страниц, в том числе 114 рисунков, 16 таблиц и 2 приложения.

В первой главе диссертации представлен анализ исследований в области использования низкопотенциального тепла криопродукта для получения энергии. Приводится достаточно полный обзор основных термодинамических циклов НЭУ ЛА для получения энергии, а также проблем и перспектив использования низкопотенциального тепла криопродукта. Отдельный раздел главы посвящен энергетическим установкам (ЭУ) космических ЛА. Вывод о типичном недостатке ЭУ космических ЛА является обоснованным. Представлен объект исследования – НЭУ ЛА, использующие низкопотенциальное тепло криопродукта, отмечается степень проработки темы в части теоретических исследований и практической реализации.

Вторая глава посвящена расширению диапазона применения и уточнению методики определения характеристик цикла НЭУ ЛА. Уточнена формула КПД «карнотизированного» цикла при расходе рабочего тела в диапазоне от 0 до 5 кг/с для НЭУ ЛА с переменным показателем степени  $m$ , являющегося многопараметрической функцией, использование которой позволяет повысить точность проектировочных расчётов НЭУ ЛА.

Третья глава посвящена уточнению общей методики комплексного проектирования НЭУ ЛА. В главе представлены разработанные численные



цикла НЭУ при расходе рабочего тела от 0 до 5 кг/с. Повышена точность проектировочных расчётов НЭУ ЛА путём уточнения методики и введения в рассмотрение совокупности параметров: температурных напоров, свойств рабочего тела, уровней температур источников тепла, потребных поверхностей теплообмена, рабочих характеристик цикла, коэффициентов теплопередачи, площади поверхности теплообмена, расхода, теплоёмкости рабочего тела, геометрических и конструктивных параметров теплообменных аппаратов.

Уточнена общая методика комплексного проектирования НЭУ ЛА. Предлагаемая методика отличается тем, что включает все этапы проектирования: от выбора криопродукта, оценки его энергетического потенциала до определения параметрических характеристик и проведения многопараметрического выбора НЭУ ЛА.

### **Обоснованность и достоверность основных результатов исследований**

Обоснованность научных положений, выводов и заключений, сформулированных в диссертационной работе, подтверждается логичностью и последовательностью решения поставленных задач, корректным применением методов математического анализа, численных методов решения задач, методов математического моделирования и физического эксперимента, основных положений и методов термодинамики, теплопередачи и теплотехники.

Достоверность полученных результатов обеспечивается сходимостью результатов численного моделирования с экспериментальными данными, применением аттестованных измерительных средств, оценкой погрешностей измерений, применение сертифицированного программного обеспечения.

### **Практическая значимость работы**

Практическая значимость заключается в разработке алгоритмов численного моделирования процессов, позволяющих обоснованно определять, с точки зрения эффективности работы, схемы и параметры рабочего процесса НЭУ ЛА. На основе проведённых исследований определены закономерности выбора НЭУ ЛА, что является основой создания баз данных по их параметрам и схемам.

### **Апробация работы и публикации**

Материалы исследования достаточно полно изложены в 22 работах, опубликованных автором по теме диссертации, в том числе в 9 статьях научных изданий, рекомендованных ВАК России, 7 статьях, опубликованных в журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus. Получены 2 свидетельства о государственной регистрации программы для



модели процессов НЭУ, в которых в качестве верхнего источника используется теплота выхлопных газов газотурбинной установки. Разработаны модели одно-, двух-, трёх- и четырёхконтурных НЭУ. Также представлен анализ характеристик цикла НЭУ с учётом их состава, свойств рабочих тел, температурных уровней и рабочих процессов, а также графически представлена оценка показателей эффективности каждого контура и установок в целом.

В четвертой главе проведена верификация усовершенствованного метода определения характеристик НЭУ ЛА, который объединяет уточнённую методику определения характеристик цикла НЭУ ЛА и уточнённую общую методику комплексного проектирования НЭУ ЛА. Анализ полученных данных позволяет заключить, что использование предложенного КПД «карнотизированного» цикла с уточнённым показателем степени  $m$  увеличивает точность определения эффективности НЭУ на величину от 2 до 20 % (разница между реальным КПД и КПД Карзона-Новикова – от 10 до 20%, разница между реальным КПД и КПД «карнотизированного» цикла – от 3 до 6%, а разница между реальным КПД и КПД «карнотизированного» цикла с уточнённым показателем степени  $m$  – от 0 до 2%).

### **Новизна проведенных исследований**

Представленные в диссертации результаты обладают научной новизной.

Наиболее существенными результатами, полученными в диссертационной работе, являются:

1. Усовершенствована математическая модель НЭУ ЛА путём уточнения показателя степени  $m$ , являющегося многопараметрической функцией, в классической формуле оценки эффективности Карзона-Новикова вида  $\eta = 1 - (T_{\min} / T_{\max})^m$ . Использование этой формулы позволяет уточнить КПД цикла, предопределить с наибольшей точностью характеристики НЭУ ЛА и учесть рабочие характеристики, геометрические и конструктивные параметры теплообменных аппаратов.

2. Впервые установлены закономерности влияния совокупности параметров (температурных напоров, свойств рабочего тела, уровней температур источников тепла, рабочих характеристик цикла, коэффициентов теплопередачи, площади поверхности теплообмена, расхода, теплоёмкости рабочего тела, геометрических и конструктивных параметров теплообменных аппаратов) на эффективность работы НЭУ ЛА. Эти результаты являются основой для повышения точности проекторочных расчётов НЭУ ЛА.

3. Расширен диапазон применения методики определения характеристик



ЭВМ. Результаты диссертационного исследования также прошли апробацию на международных и российских научных конференциях.

Результаты работы представляют собой практический интерес в вопросах повышения точности проектировочных расчётов НЭУ ЛА.

Автореферат и публикации полностью отражают содержание диссертации и соответствуют научной специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

Оформление диссертации и автореферата в основном соответствует существующим требованиям.

### **Замечания и недостатки работы**

Однако по материалам автореферата и диссертационной работы имеются следующие замечания:

1. В первой главе, на основании которой определяются цель и задачи исследования проанализированы особенности объекта исследования, НЭУ ЛА, использующие низкопотенциальное тепло криопродукта, но практически ничего не представлено по предмету исследования, параметрические характеристики и многокритериальный выбор параметров НЭУ ЛА. То же относится к автореферату.
2. Содержательная часть главы 2 начинается с оценки показателя NTU и  $kF$ , но нет пояснения в каком виде они использовались другими исследователями.
3. Часть результатов исследования, представленных в графическом виде, главы 3 и 4, не полностью раскрыты в тексте диссертации.
4. Имеются и незначительные неточности. Например применение различной размерности, глава 1, лист 19 потребление СПГ 2017 г. 795 млн тонн, рост потребления к 2030 г. прогнозируется 940млрд м<sup>3</sup>. Глава 3. Таблица 3.2, л.52. Параметр Топливопотребление – размерный или безразмерный?

### **Заключение по диссертации**

Несмотря на указанные замечания, представленная диссертационная работа выполнена на достаточно высоком научном и инженерном уровне. В целом, диссертация Тремкиной Ольги Витальевны написана на актуальную тему, имеет завершённый характер и обладает научной и практической новизной. Результаты исследования являются достаточно обоснованными, а представленный в рамках данной работы усовершенствованный метод определения характеристик НЭУ ЛА, который объединяет уточнённую



методику определения характеристик цикла НЭУ ЛА и уточнённую общую методику комплексного проектирования НЭУ ЛА, имеет прикладное значение для разработки и усовершенствования НЭУ ЛА.

Диссертация соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней» ВАК России, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Тремкина Ольга Витальевна, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

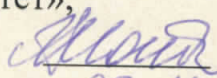
Автор отзыва дает согласие на обработку персональных данных.

Официальный оппонент

Профессор кафедры «Энергетические машины и системы управления»

ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет»,

д.т.н., профессор

 Шайкин Александр Петрович  
02.11.2023

445020, Самарская обл., г. Тольятти, ул. Белорусская, 14

Тел.: +7 (927) 897-03-28

e-mail: a\_shajkin@mail.ru

Подпись Шайкина Александра Петровича удостоверяю:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тольяттинский государственный университет»

Адрес 445020, Самарская обл., г. Тольятти, ул. Белорусская, 14, телефон (8482) 44-94-44, 44-94-24, office@tltsu.ru, http://www.tltsu.ru



  
ЗАВЕРЯЮ  
Начальник управления делами ТГУ  
  
11 2023 г.