

## УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке и цифровому развитию  
«МГТУ им. Н.Э. Баумана»

д.э.н., профессор П.А. Дроговоз



## ОТЗЫВ

### ведущей организации

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

### 1. Актуальность темы исследования

Актуальность исследования обусловлена развитием технологий использования криогенных рабочих тел, в частности, в авиационной и космической технике. Требования по повышению эффективности энергетических установок (ЭУ) для аэрокосмической техники ближнего и дальнего космоса и, в близкой перспективе, лунных станций возрастают из года в год. Одним из способов повышения их эффективности является выбор параметров рабочего процесса ЭУ летательных аппаратов (ЛА).

В настоящее время существует объективная необходимость использования криогенных веществ, которая обусловлена перспективами их использования в авиации, космосе, наземных установках, а также в технологиях для лунных станций. Так, например, при получении в условиях Луны кислорода и водорода последние будут выгодно храниться в криогенно-жидком состоянии. При этом необходимо отметить, что низкопотенциальная энергия (НЭ) криогенных продуктов в настоящее время используется не в полном объёме, то актуальной проблемой является утилизация части ранее затраченной энергии, хранящейся в криопродукте.

Разработка и исследование низкотемпературных энергоустановок (НЭУ) ЛА является относительно новым направлением аэрокосмической энергетики, поэтому появляется необходимость получения объективной, систематизированной и точной информации, касающейся всех аспектов данной области и, поэтому, данная тема является **актуальной научной задачей**.

## **2. Научная новизна положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Наиболее важным научным достижением автора диссертации является усовершенствованная 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.

Важным научным результатом является то, что автор на основании уточненной и расширенной методики определения характеристик цикла НЭУ ЛА при расходе рабочего тела в диапазоне от 0 до 5 кг/с, повысил точность проективных расчётов НЭУ ЛА путём введения в рассмотрение совокупности параметров, а также разработки алгоритма расчёта с учётом структуры и особенностей НЭУ ЛА. Применение предлагаемой методики позволяет повысить точность определения КПД на величину от 2 до 20 %

## **3. Значимость результатов работы для науки и производства**

В представленной работе была уточнена методика комплексного проектирования НЭУ ЛА путём проведения структурного анализа их схем и состава, выбора рабочих тел с учётом температурных уровней в контурах, определения критериев выбора НЭУ ЛА и проведения анализа их параметрических характеристик. Наряду с общепринятыми характеристиками, методика содержит также энерго-экономические показатели, необходимые для выбора наиболее эффективной системы.

Научный интерес представляет выполненное численное моделирование процессов НЭУ ЛА по 89 схемам с использованием усовершенствованного метода определения их характеристик, что позволило впервые установить закономерности влияния совокупности параметров (температурных напоров, свойств рабочего тела, уровней температур источников тепла, рабочих характеристик цикла, коэффициентов теплопередачи, площади поверхности теплообмена, расхода, теплоёмкости рабочего вещества, геометрических и конструктивных параметров теплообменных аппаратов) на эффективность работы НЭУ ЛА, а также разработать их классификацию по рабочим процессам, структуре и составу.

Важным научным результатом является то, что автором проведена верификация результатов по параметрам и характеристикам НЭУ на примере прототипов. Подтверждена корреляция теплового КПД и коэффициента возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь, т.е. оба этих показателя могут быть применимы для проектных оценок. КПД Карзона-Новикова и КПД «карнотизированного» цикла с уточнённым показателем степени  $m$  выведены для условия получения максимальной работы, поэтому, так как НЭ криопродукта считается «бесплатной», то основным критерием выбора

многоконтурных систем когенерации будет получение до 7 % дополнительной энергии, и возврата от 8 до 15% энергии, ранее затраченной на ожижение криопродукта.

Тремкина О.В. показала в своей работе результаты экспериментальных исследований одноконтурной НЭУ, работающей по циклу Ренкина. В ходе испытаний получены энергетические характеристики НЭУ на этапе регазификации криопродукта (жидкого азота) и на расходном режиме. Полученные зависимости эффективности цикла одноконтурной НЭУ от отношения температур показывают, что КПД Карзона-Новикова и КПД «карнотизированного» цикла с уточнённым показателем степени  $m$  качественно и количественно коррелируются, что подтверждает возможность применения КПД Карзона-Новикова для предпроектного этапа расчётов. На следующем этапе расчётов необходимо использовать предлагаемый уточнённый КПД «карнотизированного» цикла, для которого обязателен расчёт многопараметрического показателя степени  $m$ . Полученные результаты эксперимента отличаются от результатов расчёта эффективности по Карзону-Новикову в среднем на 2,6%, от результатов расчёта эффективности по формуле КПД «карнотизированного цикла» – на 2,2%, а от результатов расчёта эффективности по предложенной методике расчёта эффективности «карнотизированного» цикла с уточнённым показателем степени  $m$  – на 1,2%.

**Практическую значимость** работы имеют следующие положения:

- полученные результаты могут быть использованы для существующих и вновь проектируемых двигательных установок ЛА, а также в разработке алгоритмов численного моделирования процессов, позволяющих обоснованно определять, с точки зрения эффективности работы, схемы и параметры рабочего процесса НЭУ ЛА. На основе проведенных исследований определены закономерности выбора НЭУ ЛА, что является основой создания баз данных по их параметрам и схемам.
- Предложенный усовершенствованный метод определения характеристик НЭУ, использующих низкопотенциальную теплоту криопродукта, с улучшенными энергетическими характеристиками и высокой эффективностью создаваемых энергетических систем ЛА.

#### **4. Обоснованность и достоверность результатов работы**

Все основные положения, выносимые на защиту, являются обоснованными. Это подтверждается соответствием математических моделей физическим процессам, протекающим в реальных теплотехнических устройствах, сравнением полученных в диссертации решений с точными аналитическими решениями, с данными других авторов, с решениями численными методами, выполненными непосредственно автором диссертации. Достоверность, обоснованность и представительность результатов работы обеспечены применением при теоретическом исследовании законов сохранения в общепризнанном виде, корректным использованием экспериментальных данных, применением

аттестованных измерительных средств, оценкой погрешностей измерений, применение сертифицированного ПО.

### **5. Структура и содержание работы**

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы, включающего в себя 86 наименований. Работа содержит 178 страниц машинописного текста, 114 рисунков, 16 таблиц, 2 приложения.

Во **Введении** обоснована актуальность исследования, степень её разработанности, сформулированы цель и задачи исследования, отмечена научная новизна, теоретическая и практическая значимость выполненной работы, описаны методология и методы исследования, представлены положения, выносимые на защиту, обусловлена степень достоверности исследования и представлена информация по апробации результатов.

В **первой главе** выполнен анализ исследований в области использования низкопотенциального тепла криопродукта для получения энергии. Отмечается, что ЭУ является наиболее важным бортовым устройством ЛА, в частности космических ЛА, от которого во многом зависит конструкционное исполнение аппарата, габаритные размеры, масса и срок активного существования. Эффективность решения многих задач, связанных с дальнейшим освоением космического пространства, в значительной степени определяется достижениями в области бортовых ЭУ космических ЛА, предназначенных для снабжения различных потребителей электрической энергией.

**Глава 2** посвящена расширению диапазона применения и уточнению методики определения характеристик цикла НЭУ ЛА. Уточнена формула КПД (1) 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 проекторочных расчётов НЭУ ЛА на величину от 2 до 20 %. Повышение точности достигается путём введения в рассмотрение влияния совокупности параметров (температурных напоров, свойств рабочего тела, уровней температур источников тепла, рабочих характеристик цикла, коэффициентов теплопередачи, площади поверхности теплообмена, расхода, теплоёмкости рабочего вещества, геометрических и конструктивных параметров теплообменных аппаратов) на эффективность работы НЭУ ЛА.

В данной главе автор делает обоснованный вывод о том, что на эффективность работы НЭУ ЛА влияет совокупность параметров: температурных напоров, свойств рабочего тела, уровней температур источников тепла, а также с учётом рабочих характеристик цикла, коэффициентов теплопередачи, площади поверхности теплообмена, расхода, теплоёмкости рабочего вещества, геометрических и конструктивных параметров теплообменных аппаратов.

**Третья глава** посвящена уточнению общей методики комплексного проектирования НЭУ ЛА. В главе представлены разработанные численные модели процессов НЭУ, в которых в качестве верхнего источника используется теплота выхлопных газов газотурбинной установки. Разработаны модели

одно-, двух-, трёх- и четырёхконтурных НЭУ с учётом типа распределения подводимой тепловой энергии между контурами: последовательные, последовательно-параллельные и параллельные. Каждый контур НЭУ ЛА может работать как по циклу Ренкина, так и по циклу Брайтона путём внесения изменений в конструкцию контура и выбора рабочего тела. В данной главе 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 одно-, двух-, трёх- и четырёхконтурных НЭУ с учётом типа распределения подводимой тепловой энергии между контурами. Отсутствие расхождения в значениях КПД Карно и КПД Карзона-Новикова объясняется одинаковыми максимальным и минимальным температурными уровнями в предложенных НЭУ, что наглядно демонстрирует показатель  $1/t$ . Контур НЭУ, которые работают по циклу Ренкина, характеризуются более высоким тепловым КПД по сравнению с контурами, работающими по циклу Брайтона. Это объясняется тем, что цикл Ренкина наиболее эффективно реализуется в заданных температурных уровнях, соответствующих положению контуров в схемах НЭУ ЛА. Коэффициент возврата НЭ криопродукта с учётом предполагаемых потерь и максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта выше в контурах, работающих по циклу Ренкина, поскольку в нём затрачивается значительно меньше энергии (на 2-3 порядка) при одинаковой степени повышения давления рабочего тела, чем в цикле Брайтона. Также в главе представлены значения удельной мощности на 1 кг криопродукта в контурах НЭУ. Сделан вывод, что для увеличения мощности необходимо увеличить отношение температур рабочего тела за счёт подвода дополнительной тепловой энергии от других источников к рабочему телу, однако, для более корректной оценки показателей эффективности необходимо сохранить величину температурных уровней. Выполненный автором анализ установил, что одной из наиболее эффективных и энергетически выгодных является реализация цикла Ренкина.

В **Главе 4** содержатся результаты экспериментальных исследований одноконтурной НЭУ, работающей по циклу Ренкина. Для получения экспериментальных данных была разработана одноконтурная НЭУ и создан экспериментальный стенд. В ходе испытаний получены энергетические характеристики НЭУ на этапе регазификации криопродукта (жидкого азота) и на расходном режиме. Полученные результаты подтверждают, что КПД Карзона-Новикова и КПД «карнотизированного» цикла с уточнённым показателем степени  $m$  качественно и количественно коррелируются, что доказывает возможность применения КПД Карзона-Новикова для предпроектного этапа расчётов.

Кроме этого, в данной главе представлен анализ характеристик НЭУ и верификация усовершенствованного метода определения характеристик НЭУ как с использованием результатов экспериментальных исследований одноконтурной НЭУ, так и с использованием данных эксплуатируемых НЭУ, представленных в депонированной статье в ВИНТИ 10.04.2023, № 10-В2023.

Анализ расчётных исследований эффективных показателей, эксплуатируемых НЭУ показал, 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%).

В **Заключении** представлены результаты и выводы, отражающие итоги исследования.

Содержание диссертации изложено в логически последовательной форме. Автореферат и публикации соискателя в полной степени отражают ее наиболее существенные положения, выводы и рекомендации. Работа оформлена в соответствии с требованиями ВАК РФ к диссертациям, представленным на соискание ученой степени кандидата технических наук.

#### **6. Основные замечания по содержанию диссертации и автореферата**

В целом диссертация Тремкиной Ольги Витальевны заслуживает положительной оценки. В качестве замечаний может быть отмечено следующее:

##### **Замечания:**

1. В работе недостаточно обоснован выбор диапазона расходов рабочего тела от 0 до 5 кг/с.
2. Не рассмотрены гидродинамические особенности малорасходных криогенных НЭУ, в частности влияние паросодержания потока на энергетические показатели системы, в которых они особенно критичны.
3. Математическая модель содержит уравнения с вириальными коэффициентами, указанными с точностью до 8 значащих цифр, что непонятно ни с позиции точности расчетов, ни с позиции физического смысла этих коэффициентов.
4. В ходе экспериментальных исследований изучена работа только одноконтурной НЭУ, поэтому утверждение о верификация методики применительно к более сложным структурам некорректно.

##### **Заключение**

По значимости поставленных и решённых задач диссертационная работа является законченной научной работой, в которой содержатся результаты совершенствования метода определения характеристик НЭУ ЛА, использующих низкопотенциальное тепло криопродукта.

Работа соответствует следующим пунктам паспорта специальности «2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов»: п. 1 в части «Теория и рабочий процесс тепловых и электроракетных двигателей летательных аппаратов, а также силовых и энергетических установок...»; п. 2 в части «Характеристики тепловых, электроракетных

двигателей летательных аппаратов и их энергетических установок ...»; п. 3 «Источники энергии тепловых и электроракетных двигателей летательных аппаратов, анализ их эффективности и способов реализации энергии в цикле»; п. 4 в части «Рабочие процессы в электроракетных двигателях, энергетических установках для преобразования энергии и направленного сброса энергии...»; п. 23 «Разработка методов расчёта термогазодинамических и теплофизических процессов в двигателях и энергосиловых установках летательных аппаратов, их элементах», а также требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата технических наук специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов, и требованиям пунктов 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. №842, а её автор Тремкина Ольга Витальевна, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук.

Отзыв на диссертационную работу Тремкиной Ольги Витальевны «Совершенствование метода определения характеристик низкотемпературных энергоустановок летательных аппаратов» обсуждён и одобрен на заседании кафедры холодильной и криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения.

Присутствовали 25 чел. Результаты голосования: «за» – 25 чел., «против» – 0 чел., «воздержались» – 0 чел.

Протокол № 3 от 11 октября 2023 г.

Заведующий кафедрой «Холодильной, криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения» МГТУ им. Н.Э. Баумана,

д.т.н., доцент



Бондаренко В.Л.