

ТРЕМКИНА ОЛЬГА ВИТАЛЬЕВНА

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК
НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВОК ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки
летательных аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» (Самарский университет) на кафедре теплотехники и тепловых двигателей.

Научный руководитель:

Угланов Дмитрий Александрович, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», профессор кафедры теплотехники и тепловых двигателей.

Официальные оппоненты:

Шайкин Александр Петрович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тольяттинский государственный университет», профессор кафедры «Энергетические машины и системы управления»;

Разносчиков Владимир Валентинович, кандидат технических наук, доцент, государственный научный центр, федеральное автономное учреждение «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова», ведущий научный сотрудник отдела двигателей и химмотологии.

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «**Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)**», г. Москва.

Защита состоится 8 декабря 2023 г. в 10:00 часов на заседании 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», по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»: https://ssau.ru/files/resources/dis_protection/Tremkina_O_V_Sovershenstvovaniye_metoda_opredeleniya.pdf.

Автореферат разослан «__» _____ 2023 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.2.379.10

А.С. Виноградов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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). Объективная необходимость применения криогенных веществ 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. Учитывая то обстоятельство, что низкопотенциальная энергия (НЭ) криогенных продуктов в настоящее время используется не в полном объёме, то актуальной является проблема утилизации части ранее затраченной энергии, хранящейся в криопродукте. Например, для сжиженного природного газа (СПГ) энергозатраты составляют около 850 кВт·ч на 1 тонну, что соответствует содержанию около 830 кДж/кг НЭ, которая, в случае наличия верхнего источника теплоты, может быть использована для получения энергии.

Существует множество способов утилизации НЭ СПГ, например, для разделения воздуха, производства электроэнергии, получения углекислого газа и др. Получение электроэнергии является наиболее распространённой областью использования НЭ (как правило, для СПГ). Технологии использования НЭ при производстве энергии изучаются, совершенствуются и реализуются, в основном, для снижения нижнего уровня температуры в циклах ЭУ ЛА.

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.

В настоящее время в мире уже используются НЭУ по утилизации НЭ. Например, для СПГ наиболее развитая инфраструктура создана в Японии. Но, несмотря на применение НЭУ, основные исследования и научные публикации описывают отдельные проблемы повышения эффективности. Для формирования научной концепции разработки таких НЭУ необходимы обобщения, уточнения, дополнения результатов ранее выполненных работ, а также привнесение новых данных с перспективой их практического применения.

Все это обуславливает актуальность темы исследования.

Степень разработанности темы. Первые разработки, посвящённые использованию НЭ криопродукта, появились в 70-х годах XX века и представляли собой попытки осуществить термодинамические циклы с подводом теплоты от окружающей среды или вторичного пара и отводом теплоты к криопродукту. Большую часть разработок можно условно отнести к двум основным способам утилизации НЭ: установки, работающие по циклу Ренкина (паротурбинные установки), и установки, работающие по циклу Брайтона (газотурбинные установки). До конца 90-х годов XX века практически все разработки (за исключением небольшого числа, посвящённого установкам, работающим по циклу Стирлинга) относились к одному из этих направлений. Установки для получения энергии предлагалось устанавливать на терминалах по приёму СПГ.

Использование НЭ криопродукта позволяет получить большую эффективность термодинамического цикла без затрат энергоресурсов.

Наиболее перспективными признаны установки, работающие по циклам Ренкина и Брайтона. Для них исследовано большое количество различных схем, проведена оптимизация рабочих процессов, выбраны рабочие тела. Также значительно изучены установки для разделения воздуха. Однако многочисленные схемы предложены только в патентах и предварительных оценках. Оставшиеся установки изучены не столь хорошо

(порядка 1-2 публикаций на тему по сравнению с десятками публикаций на тему циклов Брайтона и Ренкина).

В настоящее время разработке новых типов НЭУ ЛА, использующих низкопотенциальное тепло криопродукта, исследователи и учёные всего мира уделяют всё больше внимания.

Ведущими организациями по разработке и созданию ЭУ являются АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» (г. Обнинск), Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова (г. Москва), производственные предприятия, конструкторские бюро и научные институты АО «ОДК»: ПАО «ОДК-Кузнецов» (г. Самара), ПАО «ОДК-Сатурн» и АО «ОДК-Газовые турбины» (г. Рыбинск), АО «ОДК-Авиадвигатель» и АО «ОДК-Пермские моторы» (г. Пермь), ООО «ОДК Инжиниринг» (г. Москва), АО «РКЦ «Прогресс» (г. Самара) и др.

Большой вклад в развитие криогенной техники, отечественных исследований и разработок внесли выдающиеся советские и российские учёные: Архаров А.М., Архаров И.А., Афанасьев В.А., Бродянский В.М., Грезин А.К., Григоренко Н.М., Гороховский Г.А., Жердев А.А., Журавлев А.М., Загорченко В.А., Карагусов В.И., Кунис И.Д., Малков М.П., Меркулов А.П., Микулин Е.И., Могорычный В.И., Новотельнов В.Н., Прусман Ю.О., Сычев В.В., Суслов А.Д., Филин Н.В. и др.

Цель работы. Повышение точности проектировочных расчётов НЭУ ЛА за счёт совершенствования метода определения характеристик НЭУ, использующих низкопотенциальное тепло криопродукта, основанного на обобщении, систематизации, структурном анализе и верификации данных.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи:

- 1) совершенствование математических моделей НЭУ ЛА с учётом их состава, структуры и параметрических характеристик;
- 2) расширение диапазона применения, уточнение методики определения характеристик цикла НЭУ ЛА путём разработки алгоритмов с учётом их структуры и особенностей, а также повышение точности проектировочных расчётов НЭУ ЛА;
- 3) уточнение методики 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;
- 4) численное моделирование процессов НЭУ ЛА с целью их многокритериального (многопараметрического) выбора;
- 5) верификация результатов по параметрам и характеристикам НЭУ ЛА на примере их прототипов.

Научная новизна заключается в следующем.

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 проектировочных расчётов НЭУ ЛА.

3. Расширен диапазон применения методики определения характеристик 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.

4. 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.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость работы заключается в развитии теории и метода определения характеристик НЭУ ЛА. В частности, в усовершенствовании методики определения характеристик циклов НЭУ ЛА и методики их комплексного проектирования.

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.

Методология и методы исследования. Общий методологический подход базируется на основных законах термодинамики, теплопередачи и теплотехники, современных методах математического моделирования сложных систем, методах системного анализа, теории и методах построения и реализации численных моделей. В качестве вычислительного инструментария использовались программные продукты Scilab и Mathcad, а также язык программирования Python.

Объектом исследования являются НЭУ ЛА, использующие низкопотенциальное тепло криопродукта.

Предметом исследования являются параметрические характеристики и многокритериальный выбор параметров НЭУ ЛА.

Положения, выносимые на защиту:

- математическая модель НЭУ ЛА с учётом многопараметрического показателя степени m ;
- 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;
- уточнённая методика определения характеристик цикла НЭУ ЛА с расширенным диапазоном применения при расходе рабочего тела от 0 до 5 кг/с;
- уточнённая общая методика комплексного проектирования НЭУ ЛА, включающая все этапы: от выбора криопродукта, оценки его энергетического потенциала до определения параметрических характеристик и проведения многопараметрического выбора НЭУ ЛА.

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректностью постановки задачи, использованием апробированных теоретических положений, а также сходимостью результатов верификации параметров разработанных моделей с моделями, используемыми в реальной практике проектирования НЭУ, представленными в депонированной статье в ВИНТИ 10.04.2023, № 10-B2023.

Апробация результатов исследования. Основные положения диссертационной работы, научные и практические результаты докладывались на студенческой научно-технической конференции «Лукачевские чтения» (Самара, 2017 г., 2018 г.), международной молодёжной научной конференции «Королевские чтения» (Самара, 2017 г.), самарской областной студенческой конференции (Самара, 2017 г., 2018 г.), международной научно-

технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» (Самара, 2018 г., 2019 г.), третьей международной конференции «СЕЕСТ» (онлайн, 2021 г.), втором китайско-российском форуме науки и технологий (онлайн, 2021 г.), шестой международной конференции «ICMAE» (Китай, Чэнду, 2020 г.), четвёртой международной конференции «ATDMAE» (Малайзия, Куала-Лумпур, 2020 г.), всероссийском межотраслевом молодёжном конкурсе научно-технических работ и проектов в области авиационной и ракетно-космической техники и технологий «Молодёжь и будущее авиации и космонавтики» (Москва, 2021 г., 2022 г.), всероссийской молодёжной научно-практической конференции «ЭНЕРГОСТАРТ» (Кемерово, 2021 г.), международной молодёжной научной конференции «Гагаринские чтения» (Москва, 2022 г.), всероссийском научно-техническом форуме по двигателям и энергетическим установкам (Самара, 2022 г.), на научно-технических совещаниях и семинарах Самарского университета.

Внедрение результатов работы. Результаты диссертационной работы легли в основу выполнения государственного задания по проекту №FSSS-2020-2019 «Исследование процессов преобразования низкопотенциальной энергии криопродукта в различных энергетических системах и установках» в рамках госпрограммы РФ «Фундаментальные исследования «Для долгосрочного развития и обеспечения конкурентоспособности общества и государства» (47 ГП) база ВУЗ, нашли применение в учебном процессе Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева, а также использованы в АО «Металлист-Самара», что подтверждено соответствующими актами внедрения.

Соответствие паспорту специальности. Полученные результаты соответствуют 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».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 22 работы, в том числе 9 статей в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, 7 статей в журналах и материалах конференций, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science, а также получено 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объём 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.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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 конструктивное 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. На рисунке 1 представлена структурная схема обобщённой ЭУ и её основные связи с космическими ЛА.

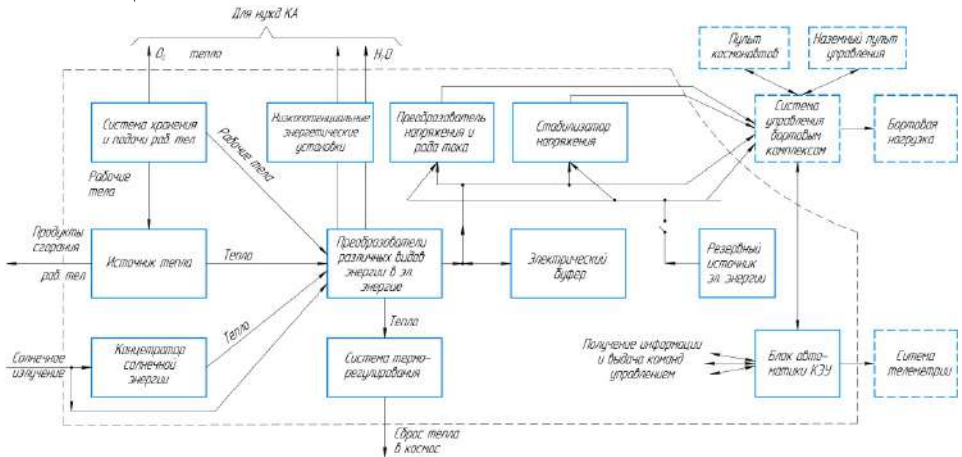


Рисунок 1 – Структурная схема ЭУ космических ЛА

В главе рассмотрены области применения НЭ криопродукта (рисунок 2).

Отмечается, что НЭ является уникальной формой энергии, поскольку она находится в криогенном состоянии и может использоваться в НЭУ ЛА для отвода теплоты термодинамического цикла.

При проектировании любых ЭУ отправным пунктом анализа будет изучение прототипов. В первой главе также представлены принципы, схемы и состав наиболее распространённых циклов когенерации и тригенерации в НЭУ.

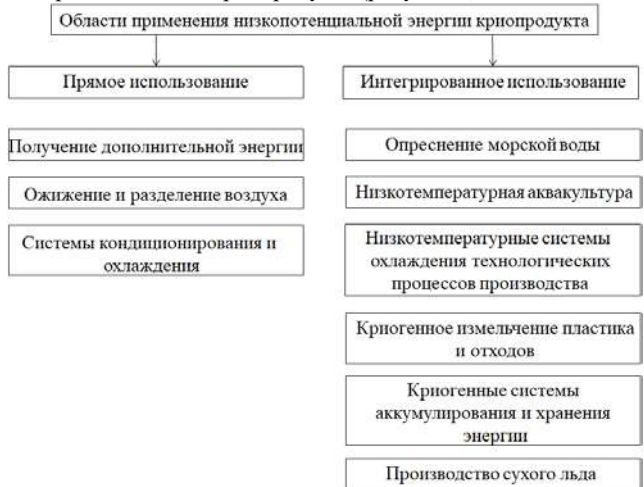


Рисунок 2 – Области применения НЭ криопродукта

Основными термодинамическими циклами НЭУ ЛА для получения энергии, являются: открытый цикл Ренкина, органический цикл Ренкина и цикл Брайтона. Среди вышеперечисленных циклов открытый цикл Ренкина является особенным, поскольку в нём используется только потенциальная энергия давления криопродукта.

На рисунках 3–5 представлены схемы НЭУ, которые могут быть использованы на борту космических ЛА. Идея использования низкопотенциального тепла для производства энергии уже имеет место в практических разработках НЭУ космических ЛА.

Усовершенствованный метод определения характеристик НЭУ ЛА объединяет уточнённую методику определения характеристик цикла НЭУ ЛА и уточнённую общую методику комплексного проектирования НЭУ ЛА.



Рисунок 3 – Схема газотурбинной ЭУ космического ЛА

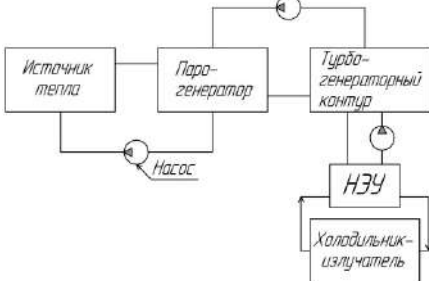


Рисунок 4 – Схема паротурбинной ЭУ космического ЛА

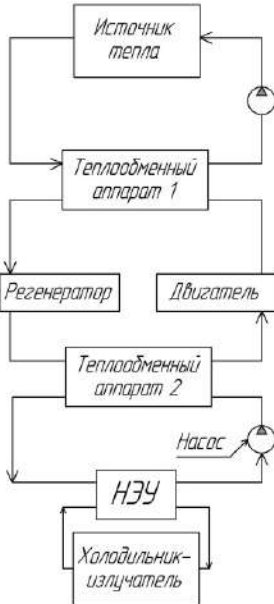


Рисунок 5 – Схема ЭУ космического ЛА с двигателем Стирлинга

Вторая глава 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 тела, геометрических и конструктивных параметров теплообменных аппаратов) на эффективность работы НЭУ ЛА.

$$\eta_{НЭУ} = 1 - \left(\frac{T_k}{T_r} \right)^m, \quad (1)$$

где T_k – низшая температура рабочего тела, К; T_r – высшая температура рабочего тела, К; m – показатель степени.

При уровне расхода криогенного рабочего тела от 0 до 5 кг/с общая зависимость показателя степени m от температуры T_k и от температурного напора ΔT_r будет определяться по формуле (2), которая получена путём уточнения зависимости показателя степени m , представленной в диссертации на соискание учёной степени доктора технических наук Угланова Д.А. Уточнение зависимости показателя степени m является новизной данного диссертационного исследования.

$$m = \alpha \cdot \Delta T_r^2 + \beta \cdot \Delta T_r + \gamma + \alpha_1 \cdot T_k^2 + \beta_1 \cdot T_k \cdot \Delta T_r + \gamma_1 \cdot T_k, \quad (2)$$

где $\alpha, \beta, \gamma, \alpha_1, \beta_1, \gamma_1$ – эмпирические коэффициенты уравнения. Уравнение зависимости показателя степени m и её графическая интерпретация для каждого диапазона расходов рабочего тела получены в результате обработки данных и численного моделирования на основе программного продукта Scilab 6.0.2.

На основании проведённых расчётов получены формулы (3) и (4) для определения эмпирических коэффициентов уравнения (2) для СПГ при разных уровнях расхода в диапазоне от 0 до 5 кг/с с помощью программного продукта Scilab 6.0.2. с задаваемой степенью достоверности за счёт аппроксимации выборочных предварительных расчётных значений показателя степени m , что позволяет определять значения показателя степени m с достаточной точностью (расхождение рассчитанных по уравнению (2) и уточнённых значений показателя m составляет не более 6 %). Уточнённые значения показателя степени m получены из расчётов при фиксированных значениях расхода и температур T_r и T_k , а также поверхности теплообмена.

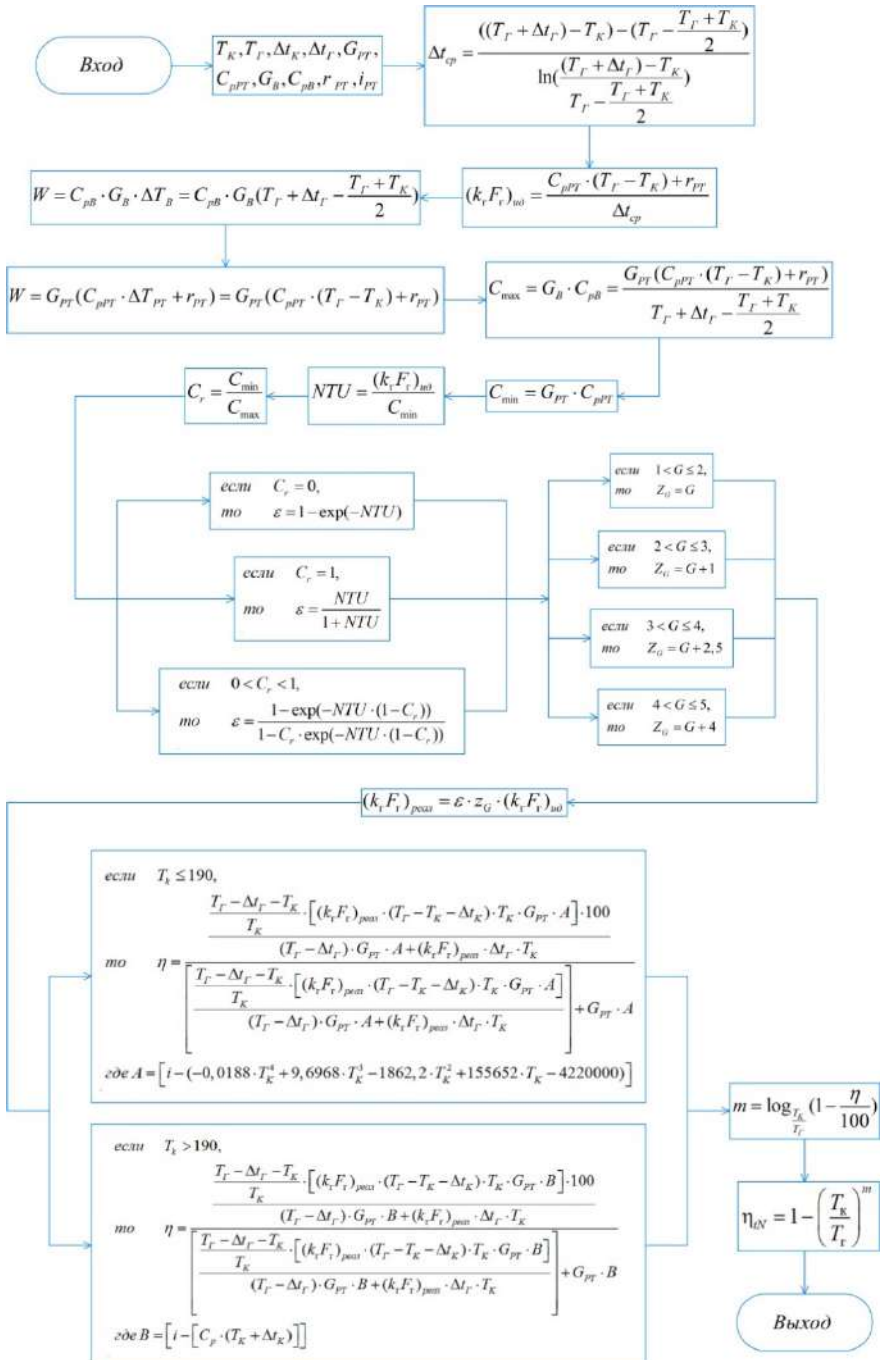


Рисунок 6 – Алгоритм для определения эффективности цикла НЭУ ЛА при условии получения максимальной мощности

Для значений расхода от 0 до 2 кг/с:

$$\begin{cases} \alpha = A_1 \cdot G^3 + B_1 \cdot G^2 + C_1 \cdot G + D_1; \\ \beta = A_2 \cdot G^3 + B_2 \cdot G^2 + C_2 \cdot G + D_2; \\ \gamma = A_3 \cdot G^3 + B_3 \cdot G^2 + C_3 \cdot G + D_3; \\ \alpha_1 = A_4 \cdot G^4 + B_4 \cdot G^3 + C_4 \cdot G^2 + D_4 \cdot G + E_4; \\ \beta_1 = A_5 \cdot G^4 + B_5 \cdot G^3 + C_5 \cdot G^2 + D_5 \cdot G + E_5; \\ \gamma_1 = A_6 \cdot G^4 + B_6 \cdot G^3 + C_6 \cdot G^2 + D_6 \cdot G + E_6. \end{cases}$$

(3)

Для значений расхода от 2 до 5 кг/с:

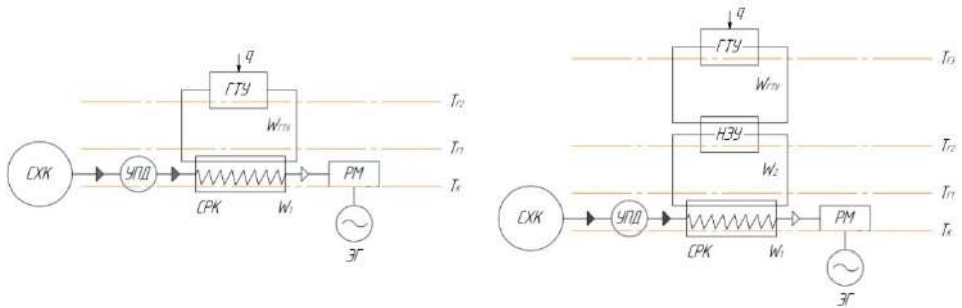
$$\begin{cases} \alpha = A_1 \cdot G^3 + B_1 \cdot G^2 + C_1 \cdot G + D_1; \\ \beta = A_2 \cdot G^3 + B_2 \cdot G^2 + C_2 \cdot G + D_2; \\ \gamma = A_3 \cdot G^3 + B_3 \cdot G^2 + C_3 \cdot G + D_3; \\ \alpha_1 = A_4 \cdot G^3 + B_4 \cdot G^2 + C_4 \cdot G + D_4; \\ \beta_1 = A_5 \cdot G^3 + B_5 \cdot G^2 + C_5 \cdot G + D_5; \\ \gamma_1 = A_6 \cdot G^3 + B_6 \cdot G^2 + C_6 \cdot G + D_6. \end{cases}$$

(4)

Алгоритм определения эффективности цикла НЭУ при условии получения максимальной мощности представлен на рисунке 6. Отличительной особенностью и научной новизной представленного алгоритма является введение в рассмотрение совокупности параметров: показателя NTU, с помощью которого проводится оценка рабочих характеристик теплообменных аппаратов, показателя влияния теплообменных аппаратов на температуры рабочих тел kF, с помощью которого проводится оценка эффективности нагрева и испарения криопродукта в теплообменных аппаратах, и расходного коэффициента Z_G , с помощью которого проводится оценка геометрических и конструктивных параметров теплообменных аппаратов.

Полученные результаты исследований позволяют утверждать, что на эффективность работы НЭУ ЛА влияет совокупность параметров: температурные напоры, свойства рабочего тела, уровни температур источников тепла, а также рабочие характеристики цикла, коэффициенты теплопередачи, площадь поверхности теплообмена, расход, теплоёмкость рабочего тела, геометрические и конструктивные параметры 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. Схемы одноконтурной и двухконтурной последовательной НЭУ, в качестве примера, представлены на рисунках 7а и 7б соответственно.



а

б

СХК – система хранения криопродукта, УПД – устройство повышения давления,

СРК – система регазификации криопродукта, РМ – расширительная машина,

ЭГ – электрогенератор, ГТУ – газотурбинная установка

а – схема одноконтурной НЭУ; б – схема двухконтурной последовательной НЭУ

Рисунок 7 – Схемы НЭУ

Уточнённая общая методика комплексного проектирования НЭУ ЛА включает этапы от выбора криопродукта и оценки его энергетического потенциала (предпроектный этап – I этап) до определения параметрических характеристик (технично-экономическое обоснование проекта – II этап) и проведения многопараметрического выбора НЭУ ЛА (разработка проектной документации – III этап). Расчёт основных параметров уточнённой общей методики комплексного проектирования НЭУ представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Основные параметры уточнённой общей методики комплексного проектирования НЭУ

№ этапа	Наименование параметра	Расчётная формула
I	Относительное приращение мощности за счёт утилизации НЭ криопродукта	$w = \frac{\sum_{i=1}^n W_i}{W_{ГТУ}};$
I	Удельная работа низкотемпературных циклов, приходящаяся на 1 кг криопродукта	$q_{СНР} = \frac{\sum_{i=1}^n W_i}{G_{СНР}};$
I	Максимальный коэффициент возврата НЭ криопродукта для каждого контура	$K_{вИД} = \frac{W_i}{G_{СНР} \cdot 3600 \cdot W_{ожИД}};$
I	Коэффициент возврата НЭ криопродукта для каждого контура с учётом предполагаемых потерь	$K_{вi} = \frac{W_i}{G_{СНР} \cdot 3600 \cdot W_{ож}};$
I	Коэффициент выработки дополнительной энергии с учётом фазового перехода	$\omega_{СНР} = \frac{W_I + W_{II}}{G_{СНР} \cdot r_{СНР}};$
I	Коэффициент выработки дополнительной энергии с учётом фазового перехода и теплоты в изобарном процессе	$\omega = \frac{W_I + W_{II}}{G_{СНР} \cdot (r_{СНР} + C_{pСНР} \cdot \Delta t_{СНР}) + G_{ГТУi} \cdot (i_{ГТУ2} - i_{ГТУ1})};$
I	Общий тепловой КПД НЭУ	$\eta_{НЭУ} = \frac{W_{ГТУ} + \sum_{i=1}^n W_i}{G_{СНР} \cdot H_u};$
I	Отношение температур для каждого контура	$\tau_i = \frac{T_{zi}}{T_{ki}};$
I	КПД Карно для каждого контура	$\eta_{ci} = \frac{T_{zi} - T_{ki}}{T_{zi}} = 1 - \frac{1}{\tau_i};$
I	Тепловой КПД для каждого контура	$\eta_{ii} = 1 - \frac{Q_{2i}}{Q_{1i}};$
I	Эксергетический КПД для каждого контура	$\eta_{exi} = \frac{\eta_{ii}}{\eta_{ci}};$
I	КПД Карзона-Новикова для каждого контура	$\eta_{Ni} = 1 - \sqrt{\frac{T_{zi}}{T_{ki}}} = 1 - \sqrt{\frac{1}{\tau_i}};$
II	Удельная мощность каждого контура на 1 кг СПГ	$W_{yoi} = \frac{W_i}{m_{СНР}} = \frac{W_i}{G_{СНР} \cdot t};$
II	КПД «карнотизированного» цикла с уточнённым показателем степени m	$\eta_{иV} = 1 - \left(\frac{T_k}{T_r} \right)^m;$
	Многопараметрическая зависимость показателя степени m	$m = \alpha \Delta T_r^{-2} + \beta \Delta T_r + \gamma + \alpha_1 \Delta T_k^{-2} + \beta_1 T_k + \gamma_1;$

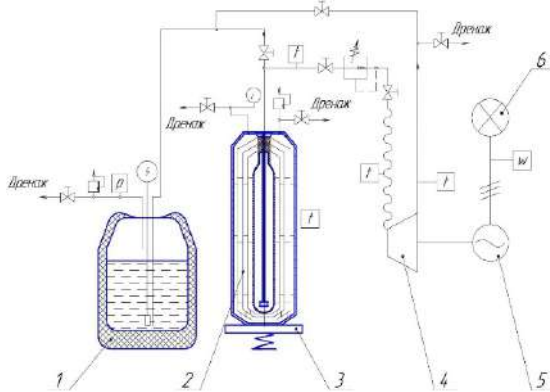
Продолжение таблицы 1

II	Тепловой КПД НЭУ, выраженный через тепловой КПД контуров с учётом типа распределения подводимой тепловой энергии между контурами	$\eta_{\Sigma} = (\eta_{ГТУ} - \eta_{II} \cdot \eta_{ГТУ} + \eta_{II} + \eta_I \cdot \sigma_{II}) \cdot \bar{\eta}_r \cdot \bar{\varepsilon};$
II	Суммарная мощность на выходе НЭУ	$W_{\Sigma} = W_{ГТУ} + \sum_{i=1}^n W_i;$
II	Коэффициент использования дополнительной работы по циклу Карно	$K_i = \frac{W_i}{W_{ki}};$
	Располагаемая мощность по циклу Карно, кВт	$W_{ki} = I_{ki} \cdot G_{СПГ};$
	Располагаемая работа по циклу Карно, кДж/кг	$I_{ki} = q_{2i} \cdot \frac{\eta_{ei}}{1 - \eta_{ei}}.$
<p>W_i – полезная мощность, вырабатываемая i-ым контуром пристроенных ЭУ, кВт; $W_{ГТУ}$ – полезная мощность газотурбинной установки, кВт; $G_{СПГ}$ – расход СПГ, кг/с; H_u – теплотворная способность топлива, кДж/кг; η_i – термический КПД соответствующего контура; $\eta_{ГТУ}$ – термический КПД газотурбинной установки; θ_i – коэффициент использования располагаемого тепла при его подводе отводе из одного контура в другой; σ_i – относительная доля вторичного тепла ГТУ, отводимая от цикла в i-ом контуре; $\bar{\eta}_r$ – осредненный КПД турбин контуров, входящих в НЭУ; $\bar{\varepsilon}$ – КПД теплообменников контуров, входящих в НЭУ; W_i – полезная мощность i-го контура, кВт; $W_{ожид}$ – значение энергии, затрачиваемой на сжижение газов по идеальному циклу, кВт·ч /кг; $W_{ож}$ – осреднённое реальное значение затраченной на сжижение криопродукта энергии, кВт·ч /кг; Q_{1i} – подведённая тепловая мощность в i-ый контур, кВт; Q_{2i} – тепловая мощность, отводимая от i-ого контура, кВт; $\alpha, \beta, \gamma, \alpha_1, \beta_1, \gamma_1$ – эмпирические коэффициенты уравнения, полученные программным продуктом Scilab 6.0.2.; $r_{СПГ}$ – удельная теплота парообразования СПГ, кДж/кг; $C_{p,СПГ}$ – изобарная теплоёмкость СПГ, кДж/кг·К; $\Delta t_{СПГ}$ – перегрев СПГ после испарения, К; $m_{СПГ}$ – масса СПГ, кг; t – время работы НЭУ, с.</p>		

В третьей 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 $1/\tau$. 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. 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.

На основании проведенного анализа можно сделать вывод, что одной из наиболее эффективных и энергетически выгодных является реализация цикла Ренкина. **В четвёртой главе** содержатся результаты экспериментальных исследований одноконтурной НЭУ, работающей по циклу Ренкина. Для получения экспериментальных данных была разработана одноконтурная НЭУ, в состав которой входит баллон высокого давления (рисунок 8). В ходе испытаний получены энергетические характеристики НЭУ на этапе регазификации криопродукта (жидкого азота) и на расходном режиме. График зависимости эффективности цикла одноконтурной НЭУ от отношения температур (рисунок 9)

показывает, 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.



1 – испарительная система заправки; 2 – баллон с криогенной заправкой; 3 – весы; 4 – турбина; 5 – электрогенератор («ОВЕН ПД 100»); 6 – нагрузка (светодиодная лампа 40 W); t – контрольные точки измерения температуры с помощью тепловизора

Рисунок 8 – Принципиальная схема одноконтурной НЭУ, работающей по циклу Ренкина

На следующем этапе расчётов необходимо использовать предлагаемый уточнённый КПД «карнотизированного» цикла, для которого обязателен расчёт многопараметрического показателя степени m . На рисунке 9 показано, что 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%.

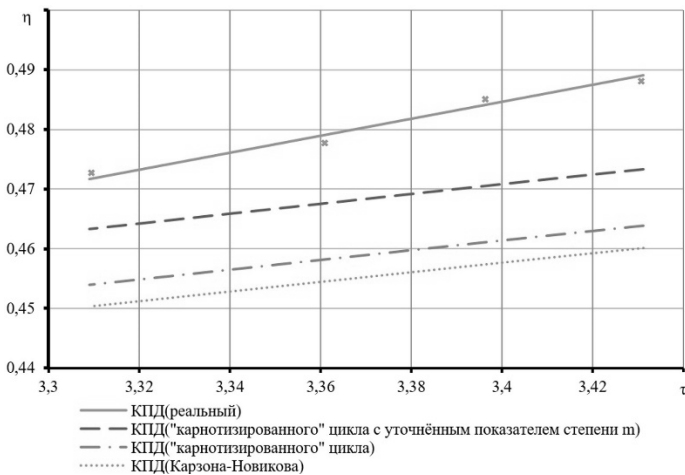


Рисунок 9 – Зависимость эффективности цикла одноконтурной НЭУ от отношения температур

Повышение точности расчёта объясняется введением 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 тела, геометрических и конструктивных параметров теплообменных аппаратов) на эффективность работы НЭУ ЛА.

Проведён 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-B2023 (рисунок 10).

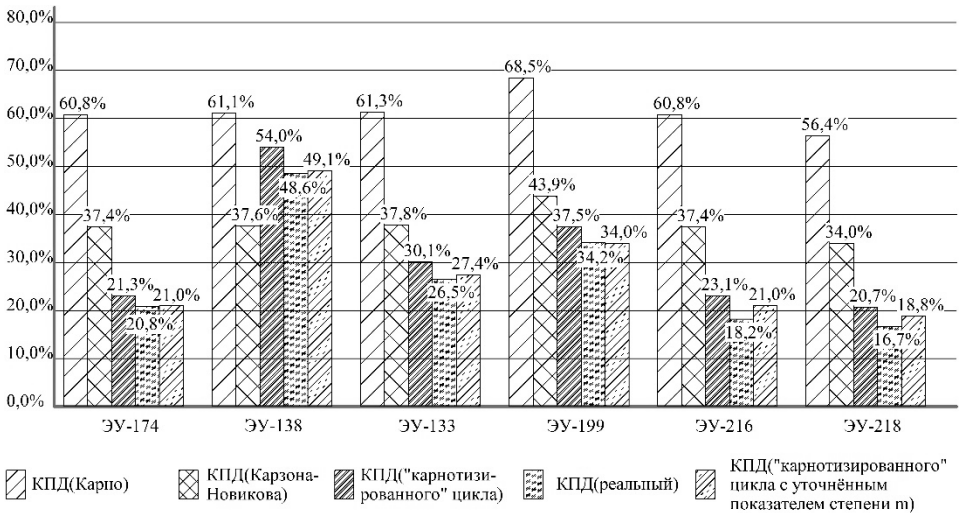


Рисунок 10 – Эффективные показатели эксплуатируемых НЭУ

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%).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненного диссертационного исследования достигнуто повышение точности проекторочных расчётов НЭУ ЛА на величину от 2 до 20% за счёт совершенствования метода определения характеристик НЭУ ЛА, использующих низкотемпературное тепло криопродукта, основанного на обобщении, систематизации, структурном анализе и верификации данных.

1. Усовершенствованы математические модели НЭУ ЛА с учётом их состава, структуры и параметрических характеристик путём уточнения показателя степени m , являющегося многопараметрической функцией, в формуле оценки эффективности вида $\eta = 1 - (T_{\min} / T_{\max})^m$. Выполнен анализ ЭУ космических ЛА. Использование НЭУ на борту космических ЛА позволит решить ряд проблем, связанных с особенностями космической энергетики, которые, в свою очередь, связаны с требованиями к массогабаритным характеристикам.

2. Уточнена и расширена методика определения характеристик цикла НЭУ ЛА при расходе рабочего тела в диапазоне от 0 до 5 кг/с, и повышена точность проекторочных 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. 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 энергоэкономические показатели.

4. Выполнено 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 тела, геометрических и конструктивных параметров теплообменных аппаратов) на эффективность работы НЭУ ЛА, а также разработать их классификацию по рабочим процессам, структуре и составу.

5. 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.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Статьи в изданиях из списка ВАК России

1. Терещенко*, О.В. Выбор оптимальной схемы гибридной криогенной энергетической установки / О.В. Терещенко, Д.А. Угланов // Насосы. Турбины. Системы. — 2019. — № 2 (31). — С. 30-36.

2. Терещенко, О.В. Выбор оптимального цикла для вспомогательной энергетической установки, работающей в составе криогенной силовой установки / О.В. Терещенко, В.В. Бирюк, С.В. Заика, Е.С. Шатохин // Вестник транспорта Поволжья. — 2020. — № 3 (81). — С. 89-96.

3. Тремкина, О.В. Расчётное исследование энергетических характеристик низкотемпературной энергетической установки, работающей на различных криогенных топливах / О.В. Тремкина, Д.А. Угланов, Р.Р. Бадьков, Р.А. Панышин // Насосы. Турбины. Системы. — 2020. — № 3 (36). — С. 40-49.

4. Тремкина, О.В. Расчёт и подбор оптимальной схемы гибридной криогенной энергетической установки, работающей на жидком водороде / О.В. Тремкина, В.В. Карнаух, А.Д. Крылова, А.Л. Лопатин, А.С. Мироненкова, Д.А. Угланов // Вестник Международной академии холода. — 2020. — № 2 (75). — С. 9-18.

5. Тремкина, О.В. Выбор оптимальной схемы и расчётное исследование параметров криогенной силовой установки беспилотного летательного аппарата / О.В. Тремкина, Д.А. Угланов, В.В. Урлапкин, С.С. Корнеев, Ю.В. Комисар // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. — 2021. — Т. 20. № 4. — С. 59-68.

6. Тремкина, О.В. Разработка и создание беспилотных летательных аппаратов с криогенной силовой установкой / О.В. Тремкина, Д.А. Угланов, Х. Аденаан // Тепловые процессы в технике. — 2022. — Т. 14. № 6. — С. 255-260.

7. Тремкина, О.В. Энергетический комплекс на СПГ, интегрированный с воздухоразделительной установкой и низкотемпературными энергоустановками / О.В. Тремкина, Д.А. Угланов, О.А. Манакова, А.Б. Шиманова // Вестник Международной академии холода. — 2022. — № 3. — С. 3-12.

8. Тремкина, О.В. Комплексная методика оценки эффективности термомеханического компрессора / О.В. Тремкина, Д.А. Угланов, Е.В. Благин // Насосы. Турбины. Системы. — 2022. — № 1 (42). — С. 56-71.

* Фамилия Терещенко О.В. изменена на Тремкину О.В. в соответствии со свидетельством о заключении брака П-ЕР № 770085, выданным Дворцом бракосочетания городского округа Самара управления ЗАГС Самарской области 21 сентября 2019 года.

9. Трёмкина, О.В. Оценка показателей эффективности схемных решений установок когенерации на базе ГТУ при использовании СПГ в качестве топлива / И.А. Архаров, А.И. Довгялло, Д.А. Угланов, О.В. Трёмкина // Химическое и нефтегазовое машиностроение — 2023. — № 1. — С. 25-30.

Статьи в изданиях, индексируемых базами данных Scopus и Web of Science

1. Tereshchenko, O.V. Calculation of the energy complex based on a steam gas installation assessment of the parameters of the contour of the auxiliary steam power plant installation / O.V. Tereshchenko, E.S. Gaev, R.A. Panshin, A.A. Shimanov, E.S. Shatohin, D.A. Uglanov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2019. — V. 692. Issue 1.

2. Tereshchenko, O.V. Calculation of parameters of the cryogenic rotor-blade engine for the drive of the refrigeration unit for truck / O.V. Tereshchenko, D.A. Uglanov, S.V. Zaika, I.A. Neverov, R.A. Panshin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2019. — V. 692. Issue 1.

3. Tereshchenko, O.V. Calculation and determination of energy parameters of the mini-chp on the basis of the heat pump / O.V. Tereshchenko, Yu.I. Grinyuk, R.A. Panshin, A.A. Shimanov, D.A. Uglanov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2019. — Vol. 692. Issue 1.

4. Tereshchenko, O.V. Comparative Analysis of Power Plants Using Low Potential Heat of Liquefied Natural Gas (LNG) / O.V. Tereshchenko, D.A. Uglanov, E.V. Blagin, R.A. Panshin, V.V. Biryuk // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2019. — Vol. 692. Issue 1.

5. Tremkina, O.V. Calculation of energy parameters of LNG power plant with utilization its cold energy / O.V. Tremkina, D.A. Uglanov, D.V. Sarmin, O.A. Manakova, A.L. Lopatin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2020. — Vol. 926. Issue 1.

6. Tremkina, O.V. LNG power complex integrated with air separation unit and low-temperature power plant / O.V. Tremkina, D.A. Uglanov, D.V. Sarmin, O.A. Manakova // Proceedings - 2021 3rd International Conference on Electrical Engineering and Control Technologies, CEECT 2021. — 2021. — P. 187-190.

7. Tremkina, O.V. Comprehensive Solution to Improve the Efficiency of the LNG Energy Complex Through the Use Cold Energy of Cryoproducts / O.V. Tremkina, O.A. Manakova, R.A. Panshin // Proceedings - 2021 7th International Conference on Mechanical Engineering and Automation, ICMEAS 2021. — 2021. — P. 155-159.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ

1. Программа для расчёта каскада турбин энергетического комплекса на основе ёмкости с криогенной заправкой / Угланов Д.А., Благин Е.В., Шиманова А.Б., Шиманов А.А., Марахова Е.А., Трёмкина О.В., Сивуха Д.В. // Программа для ЭВМ № 2023617910, опублик. 17.04.2023 г.

2. Программа для определения эффективности цикла Ренкина при условии получения максимальной мощности применительно к низкотемпературным энергетическим установкам, использующим криопродукт в качестве рабочего тела / Угланов Д.А., Трёмкина О.В., Шихалев В.И., Угланов С.Д., Шиманов А.А. // Программа для ЭВМ №2023617605, опублик. 11.04.2023 г.