

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Белявского Александра Евгеньевича

«Методологические основы проектирования системы обеспечения теплового режима лунной базы», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.5.14. «Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов»

Планируемое развертывание обитаемой базы на поверхности Луны в соответствии с целями и задачами, изложенными в «Стратегии развития Государственной корпорации по космической деятельности «Роскосмос» на период до 2025 г. и перспективу до 2030г.» предполагает начало работ по проектированию системы обеспечения теплового режима (СОТР) лунной базы.

Новые требования, возникающие при проектировании СОТР лунной базы, связанные с спецификой лунной среды, не позволяют применять отработанные структурные схемы и агрегатную базу без модернизации, разработки новой элементной базы, новых конструкторских решений и разработки новых структурных схем.

Спецификой лунной среды является высокая температура лунной поверхности, достигающая 400 К в течение лунного дня, приводящая к невозможности отвода теплоты на требуемом температурном уровне для жизнедеятельности лунной базы; гравитация, равная 1/6 g от земной, вызывающая ограничения в применении аксиальных тепловых труб; наличие лунной пыли, приводящей к деградации оптических характеристик излучающих поверхностей; удаленность Луны от Земли, приводящей к удорожанию доставки грузов и удлинению времени перевозки; недостаток информации о характеристиках лунной среды, характеризующий наличие эпистемической неопределенности в параметрах лунной среды.

Выше изложенное указывает на **актуальность темы диссертационной работы.**

Цель диссертации заключается в разработке методологических основ проектирования СОТР лунной базы.

Общая характеристика работы приведена во **введении**, где аргументированы актуальность научной проблемы, степень ее разработанности, цель и задачи исследования, научная новизна и новые научные результаты, теоретическая и практическая значимость работы, методология исследования, положения, выносимые на защиту, степень

Отдел документационного
обеспечения МАИ

30 11 2023

достоверности полученных результатов, представлены апробация диссертации и личный научный вклад автора.

Первая, обзорная глава достаточно традиционна. В ней приводится обзор работ отечественных и зарубежных авторов. Приведено пять концепций формирования наружного контура СОТР модуля лунной базы. Описана специфика лунной поверхности, вызывающая новые требования при проектировании СОТР лунной базы.

Исходя из указанного, определена цель работы - разработка методологических основ проектирования СОТР лунной базы.

Для достижения цели определены основные исследовательские задачи.

В главе второй представлена разработка методологических основ решения проблемы проектирования СОТР лунной базы. Предложено пять основных направлений решения научно-технической проблемы, связанной с разработкой СОТР модуля лунной базы: предложение новой структурной схемы СОТР модуля лунной базы, разработка новых агрегатов СОТР; разработка новых конструкторских решений при проектировании СОТР модуля лунной базы; разработка новых конструкторских решений при проектировании пассивной СОТР радиоэлектронной аппаратуры модуля лунной базы; комплексное использование ресурсов Луны и минимизация поставок компонентов с Земли для функционирования лунной базы, и возможность развития и расширения лунной базы с использованием ресурсов Луны; учет неопределенности параметров при проектировании СОТР лунной базы на этапе системных предпроектных исследований.

В третьей главе приведено исследование влияния условий внешней среды на поверхности Луны на СОТР лунной базы. В результате расчетов получены зависимости максимального удельного суммарного поглощенного РТО теплового потока для различных широт расположения на море и материке и максимального удельного поглощенного РТО суммарного теплового потока от широты расположения РТО для различных углов, между нормалью к поверхности РТО и направлением на центр Луны. Проведено исследование негативного влияния лунной пыли на степень черноты излучающей поверхности РТО и температуру условной внешней среды.

Четвертая глава посвящена новой конструкции РТО с использованием гибридной излучающей панели. Гибридная излучающая панель представляет собой конструкцию из двух пластин. Верхняя пластина излучающей панели выполнена из алюминия с наружным излучающим слоем. Нижняя пластина излучающей панели является гибридной графитовой структурой, состоящей из пакета графитовых пленок. Излучающая панель соединена с трубкой с теплоносителем.

Для приближенного расчета поля температур гибридного РТО разработана аналитическая двухмерная математическая модель гибридного РТО с осреднением коэффициента теплопроводности по толщине панели.

Для расчета поля температур по толщине слоев и поверхности излучающей панели РТО гибридной структуры и определения его параметров разработана трехмерная математическая модель в частных производных второго порядка.

Для охлаждения блоков радиоэлектронного оборудования пассивной СОТР лунной базы разработана гибридная излучающая панель. Панель представляет собой трехслойную конструкцию: верхний и нижний слой выполнен из алюминия с наружными излучающими поверхностями, между которыми расположена гибридная графитовая структура.

В пятой главе приведено описание экспериментального исследования, целью которого являлось исследование плоскостных и внеплоскостных теплопроводности и температуропроводности гибридной структуры и подтверждения возможности увеличения внеплоскостной теплопроводности и температуропроводности гибридной структуры путем прошивки ее металлическими элементами. Определение теплофизических свойств гибридной структуры из графита производилось нестационарным методом лазерной вспышки. Экспериментальный образец, помещается с помощью держателя в экспериментальную установку. Нагрев передней стороны образца производится коротким энергетическим (лазерным) импульсом. Повышение температуры на задней поверхности измеряется в зависимости от времени с помощью инфракрасного детектора.

Шестая глава посвящена анализу проектных параметров гибридных РТО и гибридных излучающих панелей пассивной СОТР радиоэлектронной аппаратуры.

Рассмотрена эффективность панелей с равномерным графитовым слоем и с чередующимися полосами графита. Проведен анализ эффективности гибридных панелей РТО с односторонней и двухсторонней излучающей поверхностью. Анализ показал, что максимальная эффективность ребра гибридного РТО достигается при замещении в излучающей панели дюралюминия графитом с использованием на излучающих поверхностях слоя дюралюминия в виде фольги для сохранения высоких оптических характеристик излучающих поверхностей. Проведен анализ эффективности гибридного ребра РТО от толщин слоев графита и дюралюминия для вариантов исполнения крепления дюралюминиевого слоя панели к трубке РТО встык и с огибанием.

Проведен массовый анализ и анализ надежности использования гибридной излучающей панели с блоком приборов, показавший уменьшение удельной массы типовой излучающей гибридной панели по сравнению с аналогичной по производительности излучающей панели с использованием аксиальных тепловых труб с $0,08 \text{ кг/дм}^2$ до $0,065 \text{ кг/дм}^2$.

Отказ от тепловых труб в конструкции гибридной излучающей панели приводит к отсутствию вероятности пробоя тепловых труб метеоритами и, как следствие, повышению надежности работы агрегата.

В седьмой главе рассмотрен тепловой аккумулятор внутреннего контура СОТР лунной базы. Предложена конструкция ТА пластинчатого типа с плавящимся рабочим веществом в виде плоскопараллельных пластин фазопереходного вещества, между которыми протекает теплоноситель. Представлена математическая модель ТА пластинчатого типа с использованием принципа суперпозиции для учета скрытой теплоты фазового перехода. Описано экспериментальное исследование, целью которого являлась проверка адекватности представленной математической модели ТА натурному аналогу – ТА, выполненному в виде параллельных пластин фазопереходного вещества, между которыми протекает теплоноситель.

Проверка адекватности проводилась методом сравнения температурных полей рабочих веществ смоделированного и натурального ТА при плавлении и затвердевании рабочего вещества аккумулятора, полученных в результате проведения натурального эксперимента и рассчитанных с использованием проверяемой математической модели.

В восьмой главе представлен анализ работы низкотемпературного РТО на поверхности луна в течении лунного дня. Представлена зависимость количества тепла, излучаемого низкотемпературным РТО, от высоты Солнца над горизонтом для различных широт расположения базы для районов лунных морей.

В результате проведенного анализа работы низкотемпературного РТО на Луне, поверхность Луны условно поделена на три области: полярная, средних широт и экваториальная. Полярной считается область, где РТО полностью справляется с отводом тепла. Средними считаются широты, где РТО в течении лунного дня еще может передать в окружающее пространство некоторое количество тепла, но полностью справится с отводом тепла из жилого модуля базы не может. Экваториальной областью считаем широты, где в лунный полдень отвести тепло РТО не может в принципе.

В качестве решения задачи обеспечения теплового режима базы, расположенной в средних широтах и экваториальной области, предложен отвод избыточного тепла из модуля базы в течение лунного дня в ТА с

рабочим веществом на основе реголита, с последующим отводом его в течение лунной ночи в космическое пространство.

Приведен расчет и анализ теплофизических свойств реголита. Предложено для увеличения теплопроводности и удельной теплоемкости заполнить поры между частицами реголита водой.

В девятой главе представлена разработанная схема фазопереходного ТА наружного контура трубчатого типа на основе реголита с водой для обеспечения теплового режима лунной базы в течение лунных суток.

Приведена математическая модель элементарной ячейки ТА наружного контура СОТР на основе реголита с водой. Приведены результаты расчетов температурного поля ячейки ТА наружного контура СОТР и теплоносителя в теплообменной трубке ТА. Расчеты подтвердили возможность обеспечения температурного режима модуля лунной базы с помощью теплоаккумулирующих устройств.

В десятой главе представлена разработанная новая структурная схема СОТР лунной базы с ТА в наружном контуре. Представлена принципиальная схема внутреннего и наружного контуров СОТР лунной базы, расположенной в полярной области и районах средних широт и экватора. Разработана математическая модель СОТР модуля базы, располагаемой в средних широтах и в экваториальной области с использованием теплового аккумулятора во внешнем контуре.

В одиннадцатой главе представлены результаты моделирования с использованием разработанной математической модели СОТР лунной базы с ТА в наружном контуре динамических режимов СОТР лунной базы, расположенной в средних широтах, на экваторе и в полярной области. Анализ полученных зависимостей выявил возможность уменьшить за счет учета переменных по времени внешних тепловых нагрузок и теплоемкости конструкций контура площадь РТО на 6% и на 24 % массу теплового аккумулятора, что приводит к соответствующему уменьшению массы системы.

Двенадцатая глава посвящена анализу экономической эффективности использования лунных ресурсов для эксплуатации и развития лунной базы.

Представлены варианты снабжения лунной базы водой, водородом и кислородом. Приведены результаты экономического анализа затрат для различных вариантов снабжения базы с учетом полной стоимости жизненного цикла добычи компонентов на Луне, снабжения с Земли и регенерации продуктов жизнедеятельности экипажа с использованием комбинированного метода прогнозирования себестоимости изделий РКТ на основе синтеза экспертного и аналогово-сопоставительного методов. На основании

проведенного анализа сделан вывод, что при эксплуатации базы свыше семи лет приоритетным является добыча кислорода и водорода из лунных ресурсов с регенерацией воды из продуктов жизнедеятельности экипажа.

Тринадцатая глава посвящена разработке методологии предварительного проектирования СОТР лунной базы в условиях неопределенности параметров. Для учета эпистемической параметрической неопределенности разработаны математические модели, алгоритмы и программы на основе теории неопределенности Баодина Лю.

В главе описывается алгоритм оптимизации СОТР в условиях эпистемической неопределенности параметров: формализуется постановка задачи оптимизации параметров СОТР в условиях эпистемической параметрической неопределенности; с помощью экспертов строятся функции распределения неопределенности для неопределенных параметров вычисляются дубликаты целевых функций и ограничений; задача с неопределенными параметрами переводится в детерминированную задачу математического программирования; для решения детерминированной задачи предлагается использовать генетический алгоритм решения задачи многокритериальной оптимизации.

С использованием алгоритма проектирования в условиях неопределенных параметров проведена минимизация приведенной массы РТО при заданных в техническом задании ограничениях на температуру теплоносителя на выходе из РТО, количества тепла, отводимого РТО и требуемого уровня вероятности отсутствия пробоя трубки РТО.

Научная новизна диссертации состоит в том, что автором впервые теоретически и экспериментально обоснована и разработана методология исследования и проектирования СОТР лунной базы и получены следующие научные результаты: методологические основы решения комплексной научно-технической проектирования системы обеспечения теплового режима лунной базы; новая структурная схема СОТР модуля лунной базы, включающая в состав наружного контура тепловой аккумулятор с рабочим веществом на основе реголита и в состав внутреннего контура теплового аккумулятора с плавящимся рабочим веществом; новые элементы и агрегаты для СОТР лунной базы, как то РТО гибридной структуры, Излучающая панель гибридной структуры пассивной СОТР радиоэлектронной аппаратуры модуля лунной базы, ТА трубчатого типа наружного контура на основе реголита с водой, претерпевающей фазовый переход; результаты экспериментальных исследований и разработка на их основе математической модели теплового аккумулятора внутреннего контура СОТР с фазопереходным рабочим веществом, с использованием принципа суперпозиции для учета скрытой

теплоты фазового перехода; математическая модель ТА трубчатого типа наружного контура СОТР на основе реголита с водой для обеспечения теплового режима лунной базы в течение лунных суток с использованием принципа суперпозиции для учета скрытой теплоты фазового перехода; математическая модель новой структуры СОТР лунной базы с использованием теплоаккумулирующих устройств, результаты численного моделирования динамических режимов и оценки проектных параметров СОТР лунной базы с теплоаккумулирующими устройствами; результаты технико-экономического анализа и обоснования целесообразности использования местных лунных ресурсов при разработке схем и новой элементной базы СОТР лунного модуля; математические модели и алгоритмы, основанные на применении теории неопределенности, предложенной Баодин Лю с использованием генетического алгоритма оптимизации, для проектирования СОТР лунной базы в условиях эпистемической неопределенности параметров на этапе системных предпроектных исследований; Новые расчетные результаты по режимам функционирования СОТР лунной базы в условиях эпистемической неопределенности параметров, полученные на основе вычислительных экспериментов с помощью разработанных математических описаний данной системы, включающие проектные параметры РТО гибридной структуры, излучающей панели гибридной структуры пассивной СОТР радиоэлектронной аппаратуры модуля лунной базы, теплового аккумулятора наружного контура СОТР с рабочим веществом на основе реголита.

Достоверность полученных результатов и обоснованных выводов подтверждается строгой формулировкой основных положений исследований и используемых формализованных описаний, применением базовых методов анализа. Допущения, принимаемые при разработке математических моделей, являются традиционными и возможность их использования подтверждена многочисленными исследованиями в практике работы проектно-конструкторских организаций.

Практическое значение диссертации. Разработана новая структурная схема СОТР лунной базы, методики выбора проектных параметров РТО гибридной структуры, излучающей панели гибридной структуры пассивной СОТР радиоэлектронной аппаратуры модуля лунной базы, теплового аккумулятора наружного контура СОТР с рабочим веществом на основе реголита, теплового аккумулятора внутреннего контура СОТР с плавящимся рабочим веществом, реализованные в методологическом, математическом и программном обеспечении проектирования, в практических рекомендациях по исследованию и проектированию СОТР лунной базы.

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, подтверждена строгостью и корректностью математических формулировок, проведением обширных параметрических исследований.

По диссертации имеются следующие замечания:

1. Во введении диссертации указана величина максимальной относительной погрешности расчетов, которая не превышает 20%. Не понятно, к чему она отнесена и каким образом получена.

2. В четвертой главе диссертации предложены аналитические математические модели гибридных РТО и гибридных излучающих панелей. Следовало определить и указать области значений исходных данных моделей, при которых они дают приемлимый для практики результат.

3. В главе 4 хотелось бы видеть ответ на вопрос почему при росте ширины ребра результаты расчета эффективности ребра по двумерной аналитической модели РТО и более сложной трехмерной модели сближаются и в итоге практически совпадают.

4. На стр. 176 в математической модели теплового аккумулятора формулы для определения чисел Нуссельта необходимо дополнить критериальной зависимостью для переходного режима течения теплоносителя ($2300 < Re < 10000$), в противном случае расчеты могут привести к заметной ошибке.

Указанные выше замечания, не снижают научную и практическую ценность диссертации, не ставят под сомнение значимость представленных в диссертации результатов, квалификацию соискателя и положительную оценку диссертационной работы А.Е. Белявского.

Основное содержание диссертации опубликовано в периодической печати и доложено на семинарах и конференциях. Автореферат диссертации объективно и в полной мере отражает содержание диссертации.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней».

Представленная диссертация А.Е. Белявского соответствует паспорту специальности 2.5.14. «Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов». Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой решена актуальная научная проблема, имеющая важное народно-хозяйственное значение. Разработаны методологические основы проектирования СОТР лунной базы, обоснованы новые структурные схемы СОТР, предложены новые конструкторские решения. В результате экспериментальных исследований получены данные по теплофизическим свойствам разработанной гибридной структуры.

Диссертация А.Е. Белявского выполнена на высоком научном уровне. По актуальности темы, степени обоснованности основных научных положений, выводов и рекомендаций, их достоверности и новизне, а также ценности для науки и практики диссертация соответствует критериям, в том числе, - требованиям п. 9 – 14, п. 23 и критериям, установленным Положением ВАК о присуждении ученых степеней, утвержденным Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842, с изменениями, которые утверждены Постановлением Правительства РФ от 20.03.2021 № 426, а автор диссертации, Александр Евгеньевич Белявский, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.5.14. – Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов.

Официальный оппонент

доктор технических наук,
профессор, заведующий кафедрой
Тепломассообменных процессов и
установок
ФГБОУ ВО «Национальный
исследовательский университет
«МЭИ»

Гаряев Андрей Борисович

«27» ноября 2023 г.

111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1.
Тел. +7 495 362-70-40
E-mail: GariyevAB@mpei.ru

Гаряев Андрей Борисович



ЗАМЕСТИТЕЛЬ НАЧАЛЬНИКА
УПРАВЛЕНИЯ ПО РАБОТЕ С ПЕРСОНАЛОМ
И.И. ДОЛБЕЖАК