

## 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

Начальной точкой отсчета эпохи контактных методов исследования Луны следует считать 19 сентября 1959 года, когда на её поверхность станцией «Луна-2» был сброшен вымпел СССР. Затем в течение 1965 года последовали спуски на неё ряда советских автоматических межпланетных станций (АМС), передача 27.10.1959 АМС «Луна-3» фотоснимков поверхности обратной стороны Луны и в 1966 г. окрестностей у посадочных опор АМС «Луна-9». 20 июля 1969 года на пыльной поверхности Луны оставили следы члены экипажа миссии «Аполлон-11», а в 1970 году уже наш «Луноход-1» исколесил свыше 10 км среди кратеров Луны. В результате последующих миссий на Луну в лаборатории институтов СССР и США были доставлены образцы грунта естественного спутника Земли.

Эти экспедиции позволили значительно расширить знания землян о лунной природе, натолкнувшие их на мысль о возможности использования этого ближайшего к Земле объекта в качестве дополнительной кладовой природных и энергетических ресурсов и площадки для более продуктивного исследования тайн ближнего и дальнего космоса. Для реализации этих намерений человечество выдвигает перед собой **глобальную актуальную проблему** – возведение на Луне обитаемых лунных баз. В конце прошлого и начале XXI века в отечественной научно-технической литературе и других развитых в области космонавтики стран стали появляться публикации, описывающие варианты **методологии проектирования лунных баз**.

Научные исследования, проведенные Белявским А.Е. в рассматриваемой диссертации, касаются **методологии проектирования** одного из важных элементов лунной базы: её **системы обеспечения теплового режима (СОТР)** в экстремальных лунных условиях, т.е. направлены на решение одной из **актуальнейших проблем космонавтики**, являющейся составной частью полного решения **глобальной проблемы** создания лунных баз.

Диссертация представляет собой **объемный научный труд** автора, основное содержание которого изложено во **Введении, 13 главах и** **Заключении**.

Отдел документационного  
обеспечения МАИ

«16» 11 2023

Во **Введении** приведена общая характеристика работы: обоснована **актуальность** темы, сформулированы **цель** решения проблемы, перечислен перечень **задач** исследования, отмечены **научная новизна**, **теоретическое** и **практическое** значение работы, сформулированы **выносимые на защиту положения** и отмечен личный вклад автора.

В **главе 1** на основе анализа существующих достижений в разработке **методологии** проектирования и создания СОТР ИСЗ и долговременных орбитальных станций, автор работы расширяет границы методологии проектирования последних, дополняя это **учение** новой схемой и новыми элементами структуры, логическими и техническими их связями, выбором новых решений обеспечения эффективного функционирования создаваемой СОТР в экстремальных лунных условиях.

В **Главе 2** обозначены контуры **методологии** проектирования СОТР лунной базы минимальной конфигурации (мощность тепловыделения - 12 кВт, население - 3 человека). Начертаны принципы использования гибридных схем излучающих поверхностей РТО, тепловых аккумуляторов, работающих в существующей неопределенности лунных условий, показаны основные пути комплексного использования ресурсов Луны и возможность развития и расширения лунной базы с использованием этих ресурсов.

В **главе 3** описаны география лунной поверхности, характеристики реголита, приведены результаты расчета удельного поглощенного теплового потока для различных широт расположения РТО на Луне, исследовано негативное влияние лунной пыли на степень черноты излучающей поверхности РТО, предложены способы защиты оборудования СОТР от лунной пыли.

В **главе 4** описана гибридная конструкция излучающей панели РТО и панели пассивной СОТР радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), представляющие собой двух- и, соответственно, трехслойную конструкцию. У панели РТО излучающий слой выполнен из алюминия, а под ним уложен слой графитовой структуры. У панели РЭА слой графитовой структуры уложен между двумя излучающими поверхностями из алюминия. Эти конструкции предлагается использовать в СОТР для лунных баз. Здесь же приведены результаты расчета распределения температуры на излучающих поверхностях панелей и их тепловая эффективность, а также разработанная приближенная аналитическая двухмерная математическая модель гибридного РТО и РЭА для приближенного расчета указанных характеристик и сравнения их с результатами расчета по трехмерной математической модели в частных производных второго порядка.

**Глава 5** посвящена проведению нестационарным методом лазерной вспышки экспериментов по определению температуропроводности вдоль поверхности и по нормали к ней на образцах излучающей панели РТО гибридной структуры из высокопроводящей фольги пиролитического графита в диапазоне температур 256-372К. Полученные результаты эксперимента позволили установить аппроксимационные зависимости для внеплоскостных и плоскостных коэффициентов температуропроводности и теплопроводности.

**В главе 6** представлены результаты расчетного анализа эффективности гибридного ребра РТО различной конструкции по типу крепления излучающего слоя панели к трубке (встык и с охватом её), с равномерным графитовым слоем и с чередующимися полосами графита, с односторонней и двухсторонней излучающей поверхностью и др. 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. Кратко рассмотрены вопросы вероятности пробоя метеоритами излучающих поверхностей гибридных РТО.

**В главе 7** рассматриваются вопросы, связанные с использованием во внутреннем контуре СОТР теплового аккумулятора (ТА) с плавящимся рабочим веществом пластинчатого типа, выполненного в виде параллельных пластин фазопереходного вещества, между которыми протекает теплоноситель: представлены его математическая модель, результаты экспериментальной проверки адекватности представленной математической модели ТА его натурному аналогу. В результате проведенных исследований показано, что предложенная математическая модель ТА с плавящимся рабочим веществом обладает удовлетворительной точностью. Максимальная погрешность расчетов составляет 15%.

**В главе 8** расчетным образом показано, что предлагаемая конструкция РТО во время лунного дня (14 земных суток) при разумных размерах излучающей поверхности не может быть использован для отвода избыточного тепла из модуля базы при расположении её в районах средних широт и экватора Луны. В этом случае предложено использовать в наружном контуре СОТР ТА с рабочим веществом на основе реголита, с последующим отводом его тепла в течение лунной ночи в космическое пространство. Определено, что смесь реголита с водой существенно повышает теплопроводность и удельную теплоемкость рабочего вещества и это на 80% уменьшает его объем.

**В главе 9** разработаны принципиальная схема указанного выше фазопереходного ТА трубчатого типа для наружного контура СОТР с рабочим веществом реголит с водой и нестационарная трехмерная математическая модель второго порядка в частных производных с использованием принципа суперпозиции для учета скрытой теплоты фазового перехода, позволившая определить основные проектные параметры ТА.

**В главе 10** представлены разработанные автором диссертации структура, принципиальные схемы внутреннего и наружного контуров СОТР лунных баз с теплоаккумулирующими устройствами, располагаемых в полярной области и в районах средних широт и экватора Луны и соответствующие узловые математические модели, алгоритмы и программы для численного исследования динамических режимов и оценки проектных параметров таких СОТР, основные результаты которых представлены в **главе 11**.

**Глава 12** содержит рассуждения автора относительно возможности использования для строительства и эксплуатации лунных баз местных ресурсов и вопросы стоимости жизненного цикла базы в условиях добычи компонентов на Луне, снабжения с Земли и регенерации продуктов жизнедеятельности экипажа и сделан вывод, что при сроке функционирования лунной базы более 7 лет, приоритетным становится обеспечение её комбинированной системой из добывающе-производственных комплексов по кислороду и водороду, работающих совместно с системой регенерации воды из отходов жизнедеятельности экипажа.

**В главе 13** на основе теории неопределенности, предложенной Баудином Лю, проведена оптимизации проектных параметров РТО СОТР модуля лунной базы в условиях неопределенности степени черноты излучающей поверхности РТО, окружающих температурных условий и коэффициентов уравнения распределения потока метеоритных частиц. При заданных в техническом задании значениях отводимого количества тепла, и требуемого уровня вероятности отсутствия пробоя трубки РТО получены оптимальные значения проектных параметров РТО при степени достоверности неопределенных параметров 0,95. Исследована также теплоемкостная характеристика ТА на основе реголита с водой в условиях параметрической неопределенности лунной среды: пористости реголита, его насыпной плотности и теплоемкости.

**К новым научным результатам диссертации** следует отнести разработанные автором:

- методологию проектирования СОТР лунной базы, описывающую новую структурную схему системы, включающую в состав её наружного контура ТА трубчатого типа с рабочим веществом на основе реголита и в состав её внутреннего контура ТА с плавящимся рабочим веществом;

- конструкцию РТО с новой гибридной двухслойной панелью, наружный излучающий слой которой выполнен металлическим, а под ним – слой из пакета фольги пиролитического графита с высокой плоскостной теплопроводностью;

- конструкцию излучающей панели гибридной структуры пассивной СОТР РЭА с трехслойной тепловоспринимающей и излучающей панелью, наружные излучающие слои которой металлические, а внутренний слой составлен из пакета фольги пиролитического графита с высокой плоскостной теплопроводностью;

- конструкцию ТА трубчатого типа наружного контура на основе реголита с водой, претерпевающей фазовый переход;

- результаты экспериментальных исследований теплофизических свойств образцов гибридного РТО и гибридной излучающей панели РЭА и разработанные на их основе математические модели этих конструкций;

- результаты экспериментальных исследований и разработка на их основе математической модели ТА внутреннего контура СОТР с фазопереходным рабочим веществом, с использованием принципа суперпозиции для учета скрытой теплоты фазового перехода;

- математическую модель ТА трубчатого типа наружного контура СОТР на основе реголита с водой для обеспечения теплового режима лунной базы в течение лунных суток;

- математическую модель СОТР новой структуры с использованием ТА, для численного моделирования динамических режимов и оценки проектных параметров СОТР лунной базы и результаты соответствующих расчетов с ТА;

- результаты технико-экономического анализа в обоснование целесообразности использования местных лунных ресурсов при разработке схем и новой элементной базы СОТР лунного модуля;

- математические модели и алгоритмы проектирования СОТР лунной базы в условиях неопределенности параметров внешней среды на этапе предпроектных исследований и полученные результаты расчетов.

**Обоснованность и достоверность научных положений, заключений и рекомендаций, сформулированных в диссертации.**

Диссертационная работа Белявского А.Е. базируется на использовании его знаний о мировых достижениях науки и техники, накопленных им при

проектировании СОТР отечественных КА и долговременных орбитальных космических станций, и носит расчетно-экспериментальный характер по поиску новых решений, диктуемых экстремальными природными условиями Луны, которые следует принять во внимание при проектировании СОТР лунных баз. Достоверность полученных результатов и обоснованных выводов подтверждается строгой формулировкой основных положений исследований и используемых формализованных описаний, применением базовых методов анализа, используемых в конструировании космической техники и математических методов в теплотехнике.

Допущения, принимаемые при разработке математических моделей, являются традиционными и возможность их использования подтверждена многочисленными исследованиями в практике работы проектно-конструкторских организаций.

Полученные теоретические выводы автора соответствуют достигнутым им в работе результатам и подтверждаются сравнением численных решений с экспериментальными результатами, полученными соискателем, а также заимствованными из литературы.

#### **Практическая значимость диссертации.**

О практической значимости диссертации в полном объеме судить пока преждевременно, ибо до начала строительства лунных баз могут пройти десятилетия, в течение которых наука, техника и роботехника шагнут далеко вперед. Однако отдельные разработки и результаты диссертации могут найти применение в практике проектирования перспективной космической техники и уже нашли, что и подтверждено **Актами внедрения в 4 организациях страны:** АО «НИИ ТП» (гибридные структуры излучающих панелей и др.), АО «НИИХИММАШ» (новая структура СОТР с ТА и др.), ФБГУ «НИИ ЦПК им. Ю.А. Гагарина» (матмоделирование и разработка алгоритмов, основанных на применении теории неопределенности при проектировании СОТР) и ФБГОУ ВО МАИ (НИУ) (внедрение результатов диссертации в учебный процесс).

Содержание диссертации изложено в тридцати двух публикациях: из них в журналах перечня ВАК десять, в том числе без соавторства три; в журналах перечня SCOPUS одиннадцать, в том числе без соавторства семь; в сборниках тезисов докладов научных конференций девять; в авторских свидетельствах на изобретения двух.

Содержание автореферата диссертации в полной мере отражает содержание диссертации.

#### **Замечания по диссертационной работе:**

Более-менее **существенных замечаний по содержанию** выполненной Белявским А.Е. диссертации **нет**.

Основные замечания относятся к оформлению представленного к защите научного труда, затрудняющему его чтение, быстрое и однозначное понимание излагаемого:

1. Чрезмерно большой по мнению оппонента общий объем книги (407 страниц) из-за:

- расширенного в разделах 1.1-1.3, 2-2 описания поэтапного освоения Луны, структуры лунной базы (ЛБ) с описанием параметров нормальных условий жизнедеятельности людей и проблемах использования в СОТР базы тепловых труб;

- избыточно подробного описания лунного рельефа (разд. 3-1), влияния пыли на функционирование ЛБ (разд. 3.3);

- повторения одного и того же источника информации в списке литературы по 2 (4 и 153, 102 и 150), 3 (100, 109 и 148) раза;

- включения в труд главы 12, касающейся анализа использования местных ресурсов для эксплуатации и развития ЛБ, вообще-то говоря не касающейся в полной мере поставленной цели диссертации (СОТР ЛБ).

2. Часть представленных графиков и рисунков (5.1, 4.5, 4.8, 4.11) следовало бы выполнить в цвете со шкалой цветности распределения температур и соответствующих линий графика.

3. Поскольку в тексте труда постоянно встречаются термины «наружный», «внешний» и «внутренний» контур СОТР, следовало бы обозначить их границы.

4. Поскольку согласно определению: **методология проектирования— это учения о структуре, логической организации, методах и средствах поиска и принятия решений, о принципах действия и составе этого объекта, наилучшим образом удовлетворяющих определенные потребности, а также составление описания, необходимого для его создания**, автору для наглядности следовало бы представить блок-схему проектирования СОТР ЛБ в лунных условиях и логические связи каждого из блоков между собой.

Указанные замечания носят рекомендательный характер, не снижают научную и практическую ценность диссертации, не ставят под сомнение значимость представленных в диссертации результатов, квалификацию соискателя и положительную оценку этой диссертационной работы.

**Заключение.** Диссертация **А.Е. Белявского** соответствует паспорту специальности 2.5.14. «Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов», 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, ведущий научный сотрудник АО «НПО им. С.А. Лавочкина» Финченко Валерий Семенович

  
«30» октября 2023 г.

Финченко В.С.

Подпись официального оппонента заверяю

Главный научный сотрудник

«30» 10 2023 г.



Ефанов В.В.



С ответом от моего имени

16.11.2023

