

Отзыв официального оппонента на диссертацию А.Е. Белявского «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»

Диссертационная работа Белявского А.Е. посвящена задаче создания системы обеспечения теплового режима (СОТР) обитаемой лунной базы, которая в настоящее время требует решения ряда серьезных научных и технических проблем.

Обеспечение допустимых тепловых режимов любых технических объектов на Луне одна из самых сложных научных и инженерных задач терморегулирования, которые стоят сегодня перед разработчиками космической техники. Причиной этого являются, во-первых, экстремальная разница между «горячим» и «холодным» тепловыми состояниями на поверхности Луны, а во-вторых, чрезвычайно длительный период перехода от одного состояния к другому. Этот период соответствует лунным суткам, продолжительность которых составляет период около одного земного месяца.

Сочетание этих двух факторов приводит к необходимости решения конфликтующих задач. Снижение температуры поверхности Луны ночью до  $-170\text{ }^{\circ}\text{C}$  при отсутствии солнечного излучения, и возрастание ее температуры до  $+130\text{ }^{\circ}\text{C}$  при повышении поверхностной плотности падающего солнечного излучения до  $1400\text{ Вт/м}^2$  требует использования активных средств как для охлаждения объекта терморегулирования лунным днем, так и для его нагрева лунной ночью. При этом применение солнечных батарей ограничено, поскольку практически невозможно аккумулировать электрическую энергию, достаточную для работы СОТР лунной ночью в течение 15 земных суток.

Имеются классические технические решения, такие как охладители с газовым циклом в сочетании с радиоизотопными источниками тепла и

электроэнергии, тепловые аккумуляторы с фазовым переходом, радиаторы-излучатели, тепловые трубы и т.д., на базе которых потенциально можно сформировать систему обеспечения теплового режима, работающую в лунных условиях. Однако оборудование подобной системы для такого крупного объекта, как обитаемая лунная база, будет иметь настолько большие массогабаритные характеристики, что его невозможно будет доставить на Луну с помощью существующих или даже перспективных средств доставки.

Кроме того возникают вопросы по надежности подобной системы из-за влияния некоторых специфических факторов, имеющих на лунной поверхности. Например, лунная пыль достаточно быстро осаждается на поверхности радиатора-излучателя и изменяет его термооптические характеристики. Имеется большая вероятность выхода из строя тепловых труб при попадании микрометеоритов.

Исходя из того, что в настоящее время для отечественной науки исследование Луны является приоритетной задачей, в рамках которой в среднесрочной перспективе предполагается создание лунной обитаемой базы, и при этом ключевые вопросы по обеспечению теплового режима этой базы являются проблемными, задача, решаемая в диссертационной работе **Белявского А.Е., является крайне актуальной.**

**Новизна работы** состоит в том, что впервые автором решается комплексная проблема создания СОТР лунной базы, при максимально возможном применении местных лунных ресурсов в сочетании с максимально высоким приоритетом в использовании пассивных методов терморегулирования. Это позволяет довести проект такой базы до уровня реальной реализуемости при имеющихся ограниченных возможностях космических носителей и создать систему терморегулирования, удовлетворяющую наивысшим требованиям к ее надежности, предъявляемым к обитаемым космическим объектам.

**Практическая значимость работы** заключается в ее направленности на возможность реальной реализации лунной обитаемой базы при имеющихся ограничениях в средствах доставки, что делает работу научным достижением, имеющим большое народно-хозяйственное значение.

**Научная значимость работы** состоит в том, что на основании выполненных исследований и решения совокупности частных новых научных задач автором получен результат по созданию пассивной системы терморегулирования лунной научной базы с максимально возможным использованием местных ресурсов. Этот результат можно квалифицировать как крупное научное достижение.

**Достоверность и обоснованность основных выводов и результатов работы** подтверждены как собственными исследованиями автора, так и анализом имеющегося на сегодняшний день уровня, достигнутого в данной области науки и техники. Этот анализ и результаты исследований представлены в тексте диссертации.

Во **введении** обоснована актуальность решаемой проблемы, степень ее разработанности, сформулированы цель и задачи исследования, отмечены научная новизна, теоретическая и практическая ценность работы, изложена методология исследования, перечислены положения, выносимые на защиту, обоснована степень достоверности полученных результатов, представлена апробация диссертации.

**Первая глава** является обзорной и посвящена постановке и анализу научно-технической проблемы, связанной с исследованием, разработкой и проектированием СОТР лунной базы минимальной конфигурации. Рассмотрено пять концепций формирования наружного контура СОТР модуля лунной базы. Описана специфика лунной поверхности, предъявляющая новые требования к СОТР лунной базы.

Во **второй главе** представлена впервые разработанная методология решения проблемы исследования и проектирования СОТР лунной базы.

Решение научно-технической проблемы, связанной с разработкой СОТР модуля лунной базы предложено проводить по пяти основным направлениям.

**Третья глава** посвящена учету влияния условий внешней среды на поверхности Луны на СОТР лунной базы. Рассмотрены характеристики рельефа лунной поверхности. Представлено описание реголита – как слоя рыхлого слабо связанного обломочного материала, образовавшегося за счет ударной переработки пород скального основания.

**В четвертой главе** предложена новая конструкция РТО с использованием гибридной излучающей панели, состоящей 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. Представлены разработанные математические модели гибридного РТО.

**В пятой главе** представлены результаты экспериментального определения теплофизических свойств гибридной структуры. Цель проводимого экспериментального исследования заключалась в определении внеплоскостных и плоскостных температуропроводности и теплопроводности, и в подтверждении повышения внеплоскостной теплопроводности гибридной структуры из высокопроводящей фольги пиролитического графита путем прошивки пакета фольги медной проволокой.

**Глава шестая** посвящена анализу проектных параметров гибридных РТО и гибридных излучающих панелей пассивной СОТР радиоэлектронной аппаратуры. Проведен массовый анализ и анализ надежности использования гибридной излучающей панели с блоком приборов.

**В седьмой главе** представлено описание математической модели и проектный анализ теплового аккумулятора (ТА) внутреннего контура СОТР для обеспечения теплового режима лунной базы в течение земных суток. Предложен ТА, выполненный в виде параллельных пластин фазопереходного вещества, между которыми протекает теплоноситель. Проведено

экспериментальное исследование для проверки адекватности представленной математической модели ТА натурному аналогу – ТА, выполненному в виде параллельных пластин фазопереходного вещества, между которыми протекает теплоноситель.

**Глава восемь** посвящена анализу мощности и повышению эффективности рабочего вещества ТА для обеспечения теплового режима лунной базы в течение лунных суток. Проведен анализ теплофизических свойств реголита. Предложено для увеличения теплопроводности и удельной теплоемкости заполнить поры между частицами реголита водой.

**В девятой главе** представлена математическая модель ТА для обеспечения теплового режима лунной базы в течение лунных суток. Проведен анализ проектных параметров ТА. Записана математическая модель элементарной ячейки ТА наружного контура СОТР лунной базы с использованием принципа суперпозиции для учета скрытой теплоты фазового перехода.

**В десятой главе** представлена структура и математическая модель СОТР лунной базы с теплоаккумулирующими устройствами. Записана узловая 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 динамических режимов СОТР с теплоаккумулирующими устройствами лунной базы, расположенной в средних широтах, на экваторе и в полярной области.

**В главе двенадцатой** представлен анализ использования местных лунных ресурсов для эксплуатации и развития лунной базы. Представлены варианты снабжения лунной базы водой, водородом и кислородом. Проведен экономический анализ 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.

**Глава тринадцатая** посвящена разработке методологии предварительного проектирования СОТР лунной базы в условиях неопределенности 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. Проведено исследование теплоемкостной характеристики ТА на основе реголита с водой в условиях параметрической неопределенности лунной среды.

Заключение по содержанию диссертации содержит пять основных разделов.

В первом разделе заключения представлена постановка и определено содержание методологии комплексного исследования и проектирования СОТР лунной базы, включающие: постановку проблемы комплексного исследования и проектирования СОТР с учетом взаимосвязей с лунной базой и окружающей лунной средой, предложение новой структурной схемы СОТР модуля лунной базы с ТА трубчатого типа наружного контура с рабочим веществом на основе реголита и ТА внутреннего контура с плавящимся рабочим веществом, Разработку новых конструкторских решений на основе использования гибридной структуры из пакета высокопроводящей фольги пиролитического графита, покрытого с наружной стороны алюминиевой фольгой, для производства излучающих панелей РТО СОТР лунной базы и излучающих панелей пассивной СОТР радиоэлектронной аппаратуры, Оценку параметров агрегатов и СОТР в условиях параметрической эпистемической неопределенности, основанную на применении теории неопределенности Б. Лю, на этапе системных предпроектных исследований. Второй раздел заключения констатирует проведение экспериментальных исследований, в результате которых проверена адекватность разработанной

математической модели ТА с плавящимся рабочим веществом с использованием принципа суперпозиции для учета скрытой теплоты фазового перехода натурному аналогу методом сравнения температурных полей рабочих веществ смоделированного и натурального ТА, получены новые экспериментальные данные по теплофизическим свойствам гибридных структур: плоскостной и внеплоскостной теплопроводности и теплопроводности в рабочем диапазоне температур 256,3 – 372,8 К, Подтверждена возможность повышения на 38 % внеплоскостной теплопроводности гибридной структуры металлическими элементами в виде проволочных скоб, установленных перпендикулярно к плоскости поверхности гибридной структуры на всей площади насквозь по толщине. В третьем разделе заключения представлены разработанные математические модели, алгоритмы и программы оценки проектных параметров агрегатов новой конструкции СОТР лунной базы, предназначенные для: массового анализа излучающей панели гибридной структуры РТО и гибридной излучающей панели с блоком приборов; массового анализа теплопроводящей гибридной ленты; анализа надежности РТО гибридной структуры и гибридной излучающей панели от метеоритного пробоя; анализа проектных параметров теплового аккумулятора трубчатого типа наружного контура СОТР на основе реголита с водой в зависимости от расположения базы в районе лунного моря или материка для различных широт. В четвертом разделе заключения отражены разработанные математические модели, алгоритмы и программы для численного моделирования динамических режимов и оценки проектных параметров СОТР лунной базы с теплоаккумулирующими устройствами, позволившего провести выбор проектных параметров СОТР модуля базы. В пятом пункте отмечены разработанные математические модели для учета параметрической неопределенности на основе теории неопределенности Б. Лю, алгоритмы и программы для: оптимизации проектных параметров РТО СОТР лунной базы в условиях параметрической неопределенности с использованием

генетического алгоритма оптимизации; Исследования теплоемкостной характеристики теплового аккумулятора трубчатого типа на основе реголита с водой в условиях параметрической неопределенности лунной среды.

Диссертация написана ясно, логически последовательно, хорошо иллюстрирована. Отдельные новые результаты, полученные в диссертации явно имеют более широкую область использования по отношению к решаемой задаче. Так, например теплопроводы и радиаторы на базе гибридных структур, могут повысить надежность системы терморегулирования любого космического устройства. Проработанная концепция теплового аккумулятора, использующего в качестве рабочего тела окружающий грунт, применима для марсианской базы или для некоторых наземных объектов, находящихся в экстремальных метеорологических условиях.

При этом работа не лишена **недостатков**. По моему мнению, к ним можно отнести следующие аспекты диссертации:

1. Структура работы имеет избыточное количество глав. Разные главы, в которых представлены структура, моделирование параметров и экспериментальные исследования одного и того же объекта, целесообразно было объединить в единую главу.

2. Текст диссертации можно сократить без ущерба для ее содержания. В качестве примера потенциально исключаемого текста можно привести фрагмент, представленный на стр. 22: «В настоящее время определена задача превращения космоса в индустриальную площадку, образующую новую экосистему обитания рабочей деятельности человека вне Земли с целью решения проблем Человечества и освоения планет и лун Солнечной системы. Луне предстоит стать внепланетной инфраструктурой земной цивилизации Земли».

3. Спорным является привлечение автором метода «Неопределенного программирования» Баодина Лю, который в настоящее время не является общепринятым и имеет достаточно трудно воспринимаемую терминологию,



такую например, как «эпистемическая неопределенность», делающую этот метод еще более сложным для восприятия и оценки.

4. Не понятным является то, зачем для функционирования СОТР на поверхности Луны автор использует двойную периодичность тепловых состояний – лунные сутки и земные сутки.

5. Судя по тексту диссертации, автор не использовал данные по прямому измерению теплового потока из реголита к поверхности Луны, проведенному в миссиях «Аполлон-15» и «Аполлон-17». Эти данные могли бы уточнить реальный тепловой баланс аккумулятора на основе реголита, предлагаемого автором.

6. В тексте диссертации приведены недостаточно данных по моделированию распределения температуры и теплового потока в ячейках теплового аккумулятора на основе реголита, что при прочтении диссертации не позволяет сделать вывод об оптимальности выбранных размеров ячейки.

Однако данные недостатки не снижают общего высокого уровня работы и являются рекомендациями автору для будущих исследований. Основное содержание диссертации опубликовано в периодической печати и доложено на семинарах и конференциях. Автореферат диссертации в полной мере отражает содержание диссертации.

**Заключение.** Диссертация А.Е. Белявского 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. Таким образом, диссертация А.Е. Белявского выполнена на высоком научном уровне, удовлетворяет 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,  
заведующий лабораторией Астрофизических рентгеновских детекторов и телескопов, доктор технических наук

  
\_\_\_\_\_  
Николай Петрович Семена

Подпись Семены Н.П. удостоверяю,  
заместитель директора, доктор физико-математических наук, чл.-корр. РАН

  
\_\_\_\_\_  
Александр Анатольевич Лутовинов

23 ноября 2023 г.

  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН); адрес: 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32; тел.:+7(495) 333-52-12, факс +7(495) 333-12-48; e-mail: iki@cosmos.ru; сайт: www.iki.cosmos.ru