



УТВЕРЖДАЮ

Генеральный конструктор-

заместитель генерального директора

д.т.н., академик РАН,

В.А. Соловьев

2023 г.

ПУБЛИЧНОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ КОРПОРАЦИЯ
«ЭНЕРГИЯ» ИМЕНИ С.П. КОРОЛЁВА»
(ПАО «РКК «ЭНЕРГИЯ»)

Ленина ул., д. 4А, г. Королёв, МО, 141070
Тел. +7 (495) 513-86-55, факс +7 (495) 513-86-20
e-mail: post@rsce.ru; http://www.energia.ru
ОКПО 07530238; ОГРН 1025002032538
ИНН/КПП 5018033937/997450001

от 05.10.23 № 06.6/206

На № _____ от _____



ОТЗЫВ

ведущей организации

на диссертационную работу 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»

Актуальность темы диссертации

В соответствии с планируемым развертыванием обитаемой лунной базы на повестке дня стоит вопрос проектирования системы обеспечения теплового режима (СОТР) лунной базы.

При проектировании СОТР лунной базы возникает ряд особенностей, вызванных спецификой лунной среды, по сравнению с проектированием СОТР долговременных орбитальных станций. Удаленность Луны от Земли приводит к удорожанию доставки грузов и удлинению времени перевозки. Высокая температура лунной поверхности в течение лунного дня приводит к потере работоспособности низкотемпературных радиационных теплообменников (РТО). Отсутствуют точные данные о влиянии лунной пыли на функционирование агрегатов и СОТР в целом и распределении частиц в метеоритном потоке в районе орбиты Луны. Наличие гравитации требуется учитывать при компоновке аксиальных тепловых труб на элементах конструкции.

Удел документационного
обеспечения МАИ

«16» 11 2023

Выше перечисленное указывает на то, что отработанные структурные схемы СОТР долговременных орбитальных станций, пилотируемых и беспилотных космических аппаратов, и существующую агрегатную базу не удастся в полной мере и без изменений использовать при проектировании СОТР лунной базы.

Вышеизложенное указывает на **актуальность** комплексного изучения проблемы проектирования СОТР лунной базы. Разработка методологических основ проектирования СОТР лунной базы является **актуальной научной проблемой** как в фундаментальном, так и в прикладном отношении.

Научная новизна диссертации

Автором в диссертации впервые теоретически и экспериментально обоснованы и разработаны методологические основы проектирования СОТР лунной базы, что составляет **научную новизну** работы. К **новым научным результатам** относятся:

1. Методологические основы решения комплексной научно-технической задачи проектирования системы обеспечения теплового режима лунной базы, учитывающая удаленность лунной поверхности от Земли; условия гравитации, равные $1/6 g$ от земной; повышенную температуру лунной поверхности в течение лунного дня, превышающую температуру излучающей поверхности РТО; присутствие эпистемической неопределенности при выборе проектных параметров СОТР; возможность использования лунных ресурсов для развития и расширения лунной базы.

2. Новая структурная схема СОТР модуля лунной базы, включающая в состав наружного контура тепловой аккумулятор (ТА) с рабочим веществом на основе реголита и в состав внутреннего контура ТА с плавящимся рабочим веществом.

3. Новые элементы и агрегаты для СОТР лунной базы:

3.1. РТО гибридной структуры, с излучающей двухслойной панелью, наружный излучающий слой которой металлический, а внутренний слой является гибридной структурой, состоящей из пакета фольги пиролитического графита с высокой плоскостной теплопроводностью.

3.2. Излучающая панель гибридной структуры пассивной СОТР радиоэлектронной аппаратуры модуля лунной базы, с трехслойной излучающей

панелью, наружные излучающие слои которой металлические, а внутренний слой является гибридной структурой, состоящей из пакета фольги пиролитического графита с высокой плоскостной теплопроводностью на которую устанавливаются тепловыделяющие элементы радиоэлектронной аппаратуры.

3.3. Тепловой аккумулятор трубчатого типа наружного контура на основе реголита с водой, претерпевающей фазовый переход.

4. Результаты экспериментальных исследований теплофизических свойств гибридных структур и разработка на их основе математических моделей гибридного радиационного теплообменника и гибридной излучающей панели.

5. 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.

6. Математическая модель теплового аккумулятора 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.

7. 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.

8. Результаты технико-экономического анализа и обоснования целесообразности использования местных лунных ресурсов при разработке схем и новой элементной базы СОТР лунного модуля.

9. 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.

10. 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.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии теории исследования и проектирования СОТР лунной базы, впервые обоснованной и разработанной новой структурной схемы СОТР модуля лунной базы с использованием в составе наружного контура теплового аккумулятора с рабочим веществом на основе реголита, в разработке новой конструкции РТО гибридной структуры и излучающей панели гибридной структуры пассивной СОТР радиоэлектронной аппаратуры. В разработке математических моделей и алгоритмов неопределенного программирования для проектирования СОТР лунной базы в условиях эпистемической неопределенности параметров на этапе системных предпроектных исследований.

Практическая ценность диссертации

Разработана новая структурная схема СОТР лунной базы, включающая в состав наружного контура ТА трубчатого типа с плавящимся рабочим веществом. Разработаны 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.

Результаты исследований Белявского А.Е., касающиеся разработки излучающей панели гибридной структуры пассивной СОТР радиоэлектронной аппаратуры, экспериментальных исследований теплофизических свойств гибридных структур и разработки на их основе математической модели гибридной излучающей модели позволили теоретически и экспериментально обосновать

перспективность применения новых методов и средств обеспечения теплового режима радиоэлектронной аппаратуры в рамках проводимых и планируемых в АО «НИИ ТП» научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

Полученные в работе результаты по новой структурной схеме СОТР лунной базы, экспериментальным исследованиям и разработке на их основе математических моделей тепловых аккумуляторов наружного и внутреннего контура СОТР лунной базы и математическому моделированию новой структуры СОТР лунной базы использованы в АО «НИИхиммаш» при проектировании системы регенерации воды и атмосферы для лунной базы и наземной отработки прототипов систем.

Научные результаты по математическому моделированию и разработке алгоритмов, основанных на применении теории неопределенности при проектировании СОТР лунной базы в условиях эпистемической неопределенности параметров использованы в ФГДУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина» в процессе предпроектных исследований при разработке и создании перспективных образцов тренажеров и тренажерных комплексов.

Результаты исследований используются в учебном процессе кафедры 614 «Экология, системы жизнеобеспечения и безопасность жизнедеятельности» и при разработке рабочих программ по специальности шифр 24.05.01 «Проектирование, производство и эксплуатация ракет и ракетно-космических комплексов».

Целью диссертации является разработка методологических основ проектирования СОТР лунной базы.

Общая характеристика работы

Диссертационная работа состоит из введения, 13 глав, заключения, списка литературы и приложения. Работа содержит 397 страниц, 7 таблиц, 151 рисунок; список литературы включает 200 наименований.

Достоверность основных научных положений, заключения и рекомендаций, сформулированных в работе

Достоверность полученных результатов и обоснованных выводов подтверждается строгой формулировкой основных положений исследований и используемых формализованных описаний, применением базовых методов анализа. Величина относительной погрешности расчетов не превышает 20%. Допущения, принимаемые при разработке математических моделей, являются традиционными и возможность их использования подтверждена многочисленными исследованиями в практике работы проектно-конструкторских организаций. Выводы по диссертационной работе подтверждаются и иллюстрируются результатами оценки проектных параметров агрегатов и СОТР на ЭВМ; проведенными экспериментальными исследованиями теплофизических свойств гибридных структур из пакета фольги пиролитического графита, разброс полученных результатов температуропроводности находится в пределах 0,6 % относительно среднего значения; экспериментальными исследованиями фазопереходных процессов в рабочем веществе теплового аккумулятора, показавших, что относительная погрешность расчетов с использованием разработанной математической модели теплового аккумулятора с плавящимся рабочим веществом находится в диапазоне 0 – 15 %.

Рекомендации по использованию результатов и выводов, приведенных в диссертации.

1. Разработанные методологические основы проектирования СОТР лунной базы, новая структурная схема СОТР, новые принципы использования аккумулярования тепла в теплоаккумулирующих устройствах с использованием лунного реголита, новые конструктивные схемы гибридных РТО, методология выбора проектных параметров СОТР в условиях эпистемической параметрической

неопределенности могут быть рекомендованы для использования при проектировании СОТР перспективной лунной базы.

2. Разработанная гибридная излучающая панель рекомендуется для использования в АО «НИИ Точных приборов» при проектировании пассивных СОТР тепловыделяющих блоков радиоэлектронного оборудования космических аппаратов.

3. Радиационный теплообменник с гибридной излучающей панелью предлагается использовать при проектировании СОТР посадочных модулей автоматических лунных станций.

4. Разработанная методология проектирования СОТР лунной базы в условиях эпистемической неопределенности параметров лунной среды рекомендуется к использованию в ФГБУ «Научно-исследовательский испытательный центр подготовки космонавтов имени Ю.А. Гагарина» при разработке и создании перспективных образцов тренажеров и тренажерных комплексов, в том числе тренажеров управления луноходом и взлетно-посадочным лунным модулем. Применение методологии позволит уточнить диапазоны изменения неопределенных проектных параметров тренажерных систем на этапе предварительного проектирования тренажеров и тренажерных комплексов для пилотируемых полетов к Луне.

5. Новые принципы, заложенные в новую структурную схему СОТР лунной базы с использованием теплоаккумулирующих устройств, предлагается использовать при разработке максимально замкнутой системы обеспечения жизнедеятельности лунной базы.

Оценка содержания диссертации

Текст диссертации логически выстроен, диссертация наглядно иллюстрирована. По содержанию работы имеются следующие замечания:

1. На рисунке 2.5 представлены источники и потребители воды, водорода и кислорода на лунной базе. В качестве потребителя воды указан тепловой аккумулятор СОТР лунной базы. Непонятно, о каком аккумуляторе идет речь, внутреннего контура, или наружного?

2. На рисунках 5.7. Зависимость плоскостной температуропроводности и плоскостной теплопроводности от температуры образца, 5.9. Зависимость внеплоскостной температуропроводности и внеплоскостной теплопроводности от температуры образца и 5.15. Зависимость внеплоскостной температуропроводности и внеплоскостной теплопроводности от температуры образца гибридной структуры, прошитого медными скрепками отсутствуют обозначения осей координат.

Основное 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 девяти сборниках тезисов докладов научных конференций; в двух патентах на изобретения.

В автореферате излагаются основные идеи и выводы диссертации, показан вклад автора в проведенное исследование, степень новизны и практическая значимость приведенных результатов, приводится список публикаций соискателя, в которых отражены основные научные результаты диссертации.

Обсуждение диссертации проведено на заседании секции «Системы терморегулирования и жизнеобеспечения» научно-технического совета РКК «Энергия». В заседании принимали участие ведущие научные и инженерные специалисты и руководители подразделений, деятельность которых соответствует теме диссертации. Протокол заседания секции от 03.10.2023г. № 164.

Заключение

Диссертация А.Е. Белявского представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой решена актуальная научная проблема, имеющая важное народно-хозяйственное значение. Представлены методологические основы проектирования СОТР лунной базы, обоснованы новые структурные схемы СОТР, разработаны новые агрегаты для новой структурной схемы СОТР лунной базы, 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».

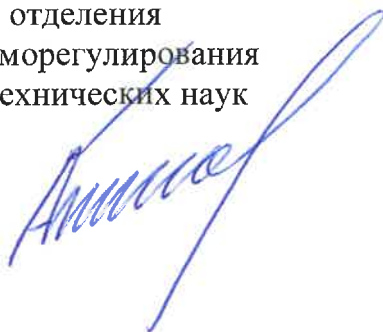
Главный научный сотрудник,
отдела аэрогазодинамики,
доктор физико-математических наук



Алексей Кириллович Алексеев

141070, Московская область
г.Королёв, ул. Ленина, д.4А,
ПАО «РКК «Энергия»
Aleksey.alekseev@rsce.ru
+7-916-846-81-51

Начальник отделения
систем терморегулирования
кандидат технических наук



Андрей Александрович Басов

141070, Московская область
г.Королёв, ул. Ленина, д.4А,
ПАО «РКК «Энергия»
Andrey.basov@rsce.ru
+7-916-589-39-82

Подписи А.К. Алексеева и А.А. Басова заверяю
ученый секретарь ПАО «РКК «Энергия»,
доктор физико-математических наук



Ольга Николаевна Хатунцева

16.11.2023
