



**НПО  
ЛАВОЧКИНА**

Акционерное общество  
«Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина»  
[АО «НПО Лавочкина»]

Ленинградская ул., д. 24, г. Химки, Московская область, 141402, ОГРН 1175029009363, ИНН 5047196566  
тел.: +7 (495) 573-56-75, факс: +7 (495) 573-35-95, e-mail: npol@laspace.ru, www.laspace.ru

« 06 ДЕК 2019 » 20\_\_ г.

№

310/30488

На № \_\_\_\_\_

от \_\_\_\_\_

Проректору по научной работе ФГБОУ ВО  
Московского авиационного института  
(национального исследовательского  
университета)  
доктору технических наук, профессору  
Равиковичу Ю.А.

125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4

Уважаемый Юрий Александрович!

Высылаю Вам отзыв на диссертацию и диссертацию Салосиной Маргариты Олеговны на тему «Методы исследования и проектирования тепловой защиты солнечного зонда с учетом параметров структуры теплозащитных материалов», представленную к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальностям 05.07.02 – Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов и 05.07.03 – Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов.

Приложение: 1. Отзыв на диссертацию на 6 л. в 2 экз.

2. Диссертация на 159 л. в 1 экз.

*С уважением,*

Заместитель генерального директора по научной работе  
доктор технических наук, профессор

С.Н. Шевченко

Иванков  
8(495) 575-53-59



**НПО  
ЛАВОЧКИНА**

Акционерное общество  
«Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина»  
[АО «НПО Лавочкина»]

Ленинградская ул., д. 24, г. Химки, Московская область, 141402, ОГРН 1175029009363, ИНН 5047196566  
тел.: +7 (495) 573-56-75, факс: +7 (495) 573-35-95, e-mail: npol@laspace.ru, www.laspace.ru

« 06 ДЕК 2019 » г.

№ 510/30488

На № \_\_\_\_\_

от \_\_\_\_\_

**УТВЕРЖДАЮ**

Заместитель генерального директора  
по научной работе,  
доктор технических наук, профессор



*[Handwritten signature]*

С.Н. Шевченко

6 » декабря 2019 г.

### ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Салосиной Маргариты Олеговны «Методы исследования и проектирования тепловой защиты солнечного зонда с учетом параметров структуры теплозащитных материалов», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальностям 05.07.02 – Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов и 05.07.03 – Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов

Функционирование межпланетных станций в космическом пространстве, предназначенных для исследования планет Солнечной системы, сопровождается внешним тепловым воздействием в основном со стороны солнечного излучения, определяющим их тепловой режим. Тепловая защита таких КА функционирует при значительных тепловых нагрузках, поэтому необходимо ее оптимальное построение как по конструктивно-технологическим, так и по массовым характеристикам. Аналогичные проблемы возникают для тепловой защиты космических спускаемых аппаратов при входе

ОБЩИЙ ОТДЕЛ МАИ  
Вх. № 09/12 2019

в атмосферы планет. Тепловое воздействие в этом случае обусловлено комбинированным тепловым воздействием (лучистым и конвективным) со стороны заторможенного у поверхности газового потока на этапе аэродинамического торможения аппарата.

Разработка тепловой защиты названных КА является сложной научно-технической задачей, которая должна быть решена при их проектировании поскольку тепловой режим КА определяет надежность работы конструкции и бортовых систем аппарата, и в значительной степени влияет на успех выполнения всей научной миссии.

Следует отметить, что уже на начальном этапе проектирования разработчикам КА приходится решать проблемные задачи, связанные с жесткими требованиями по минимизации весовых затрат на тепловую защиту. При этом остро возникают вопросы о количестве слоев применяемых материалов, об их составе, теплофизических и теплозащитных свойствах, об ограничениях по условиям прочности и допустимым температурам работоспособности. Эти вопросы должны решаться в комплексе с производственными и технологическими требованиями к конструкции КА и к его теплозащитной системе.

В связи с вышесказанным актуальной является тема диссертации М.О. Салосиной, посвященной разработке методов исследования и проектирования многослойных теплозащитных систем солнечных зондов и аппаратов, спускаемых в атмосферах планет, а также разработке соответствующего программно-алгоритмического обеспечения (ПАО) с использованием данных экспериментов.

К достоинствам работы следует отнести детальный анализ существующих подходов к решению поставленной задачи, исследование влияния факторов космического пространства (глубокий вакуум, тепловое и радиационное воздействие, эрозионное влияние пылевых частиц), воздействующих на аппарат, в числе которых выделен главный фактор, исследуемый в диссертации – воздействие теплового излучения со стороны Солнца. Среди теплозащитных материалов, исследуемых в диссертации, выделены основные – высокопористые ячеистые углеродные материалы (ВПЯМ), эффективные в качестве внутренних слоев теплозащитных систем.

Научная новизна представленных в диссертации исследований состоит в постановке и комплексном решении сформулированной научно-технической задачи об оптимизации по массе системы теплозащиты КА, состоящей из слоев материалов с различными теплофизическими свойствами. Для оптимального решения задачи предложены методы, надежно зарекомендовавшие себя в решении экстремальных задач – метод штрафных функций и метод множителей

Лагранжа. При этом для быстрого поиска начального приближения целевой функции (поверхностной плотности теплозащитного пакета) использован метод штрафных функций, а последующее уточнение проводится в рамках эффективного метода спроектированного лагранжиана и квадратичной аппроксимации целевой функции с повышенной скоростью сходимости.

Новым является корректно сформулированный набор искоемых проектных параметров и ограничений к ним, определяющий особенности реального теплозащитного пакета. Разработанный вычислительный алгоритм позволяет расширить область поиска оптимальных значений параметров тепловой защиты и вместе со значениями толщины слоев оценить оптимальные для исследуемых условий эксплуатации характеристики ВПЯМ такие, как пористость материала и размеры ячеек.

Вычислительный алгоритм в рамках предложенной математической модели для решения тепловой части задачи строится на основе численного решения системы одномерных нестационарных уравнений теплопроводности для однородных (сплошных) слоев материалов и слоев ВПЯМ теплозащитного пакета. Корректно учтены процессы переноса тепла в слоях ВПЯМ, в которых наряду с кондуктивным переносом учтен перенос тепла излучением, что в общем случае связано с трудностями, обусловленными интегродифференциальным характером уравнения переноса и существенной зависимостью интенсивности излучения от спектрального состава. В работе используется упрощенная модель переноса излучения, связанная с осреднением коэффициента поглощения излучения по Росселанду. Учтена анизотропия области решения, содержащей слой ВПЯМ. Численное решение поставленной краевой задачи для системы нелинейных уравнений в достаточно сложной и комплексной постановке, что является новым в решении подобных задач, проводится в рамках экономичной неявной разностной схемы второго порядка точности по пространственной и первого – по временной переменным.

Разработанные в диссертационной работе математическая модель и вычислительный алгоритм реализованы в программно-вычислительном комплексе, возможности которого продемонстрированы на конкретных примерах оптимизации теплозащитных систем для солнечного зонда (стационарный расчетный случай) и для аппарата, спускаемого в атмосфере Земли для тепловой нагрузки, характерной для реальной траектории входа. Представленные результаты для исследуемых расчетных случаев подтверждают эффективность разработанного подхода и практическую значимость выполненной работы, а также возможность ее применения при проектировании систем тепловой защиты КА.

Важным элементом проверки разработанного подхода является

организация экспериментов по прогреву образцов теплозащитных пакетов и сравнение результатов эксперимента с данными, полученными по созданной в диссертации математической модели, показавшим их близкое совпадение.

Практический интерес представляют результаты экспериментальных исследований теплозащитных пакетов, включающих ВПЯМ для оценки влияния геометрических и теплофизических характеристик ячеек на теплозащитные свойства пакетов. Экспериментальные результаты использовались в качестве входных данных для разработанной программы расчета. Полученные в ходе экспериментов результаты поиска оптимальных массовых характеристик пакетов, результаты по определению теплофизических свойств ВПЯМ, близкое соответствие результатов с экспериментальными данными подтверждают работоспособность созданных в диссертации математической модели и программы расчета.

Относительно стиля и качества оформления диссертации следует отметить ее логическую стройность, работа написана хорошим грамотным языком, принятым в данной области теплофизических исследований. Она снабжена качественными рисунками, а результаты оформлены в виде наглядных графиков, помогающих восприятию излагаемых материалов.

Достоверность полученных в диссертации результатов подтверждается строгостью математической и физической постановки решаемой задачи, апробацией работы на научно-технических конференциях, близким соответствием с результатами, полученных в рамках других моделей и методов, применением надежных, зарекомендовавших себя подходов, экспериментальной проверкой полученных результатов.

Личный вклад автора диссертации – в разработке математической модели, вычислительного алгоритма и соответствующего программного комплекса, а также в проведении расчетов и анализе полученных результатов, формулировке выводов, участие в подготовке экспериментов, их обработке и в последующем анализе.

Основные результаты диссертации представлены в 14 работах. Из них – 5 статей – в изданиях из Перечня ВАК России. Основные положения работы докладывались на 12 научно-технических конференциях, из них 5 международных и 7 отечественных.

Результаты, полученные в диссертации, имеют научный и прикладной характер. Они могут использоваться на предприятиях, разрабатывающих изделия ракетно-космической техники: в АО «НПО Лавочкина», АО ВПК «НПО «Машиностроения», АО «ГКНПЦ имени М.В. Хруничева», АО Ракетно-космический центр «Прогресс» и др., а также в учебных процессах МАИ, МФТИ, МГТУ им. Н.Э. Баумана и др.

Разработка математической модели и на ее основе расчетного метода, создание соответствующего вычислительного алгоритма и программного комплекса на ЭВМ для оптимального построения системы многослойной тепловой защиты КА различного назначения, реализованные в диссертационной работе, позволяют сделать вывод о том, что в результате ее выполнения решена важная народно-хозяйственная задача.

Отметим следующие замечания и рекомендации к диссертационной работе.

1. Учитывая, что результаты работы распространяются на аппараты, спускаемые в атмосферах планет, следовало бы в системе граничных условий в уравнениях теплопроводности предусмотреть процессы термического разрушения материалов как на внешней, так и на внутренних поверхностях в зонах контакта материалов, поскольку при повышенных тепловых нагрузках, характерных на этапах аэродинамического торможения КА эти процессы неизбежны. Это придало бы работе большую практическую значимость.

2. В диссертации перенос тепла излучением в слоях ВПЯМ учитывается в рамках серой модели (без учета селективности излучения) – оптически плотной среды с использованием коэффициента поглощения излучения осредненного по Росселанду. Вместе с тем в работе было бы полезно рассмотреть другой предельный случай серой модели и исследовать вариант оптически тонкой среды с использованием коэффициента поглощения излучения, осредненного по Планку.

3. Не вполне четко представлен материал, относящийся к учету переноса тепла излучением в главе 2. Не указано, например, что приведенный (частный) случай уравнения переноса излучения (2.14) соответствует случаю локального термодинамического равновесия излучения с веществом, в котором этот перенос осуществляется (*Пилюгин Н.Н., Тирский Г.А.*, 1989). Не вполне четко приведено понятие приближения оптически плотной среды (с. 44).

Содержание автореферата полностью соответствует содержанию диссертации, логика, и стиль изложения способствуют ее пониманию. Приведены основные результаты и положения, выносимые на защиту, выделен личный вклад автора, а также дано четкое представление о практической и научной значимости диссертационной работы. Вместе с тем в автореферате не отражено содержание одного из разделов диссертации – введения, не достаточно подробно представлены материалы о программной организации вычислительного комплекса.

Отмеченные недостатки не снижают достоинства работы.

На основании вышеизложенного следует вывод о том, что диссертационная работа М.О. Салосиной выполнена на высоком научном уровне, содержит решение актуальной научной задачи – разработки математической модели, вычислительного алгоритма и программного комплекса для оптимального проектирования систем тепловой защиты КА. Диссертация соответствует критериям, изложенным в пунктах 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, а ее автор, Салосина Маргарита Олеговна заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата технических наук по специальностям 05.07.02 – Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов и 05.07.03 – Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов.

Отзыв рассмотрен и одобрен на расширенном заседании отдела 516 «Отдел исследования внешних воздействующих факторов и проектирования защиты от них» АО «НПО Лавочкина», протокол № 15 от 6 декабря 2019 г.

Исполняющий обязанности  
начальника отдела 516 АО «НПО Лавочкина»  
кандидат физико-математических наук



Н.М. Хамидуллина  
«06» декабря 2019 г.

Доктор технических наук,  
ведущий научный сотрудник  
отдела 516 АО «НПО Лавочкина»



А.А. Иванков  
« 6 » декабря 2019 г.