

На правах рукописи



Шеметова Елена Владиславовна

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНЕШНИХ
ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК НА ПОВЕРХНОСТЬ КОСМИЧЕСКОГО
АППАРАТА В ИНФРАКРАСНОМ ИМИТАТОРЕ С БЛОЧНЫМИ
ЛИНЕЙЧАТЫМИ ИЗЛУЧАТЕЛЯМИ**

05.07.03 – Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель д.т.н., с.н.с.
Колесников Анатолий Васильевич

Официальные оппоненты: Сова Александр Николаевич,
д.т.н., профессор,
Акционерное общество «Государственный
космический научно-производственный центр
имени М.В. Хруничева», заместитель генерального
конструктора-начальник направления КБ «Салют»
им. В.М. Мясищева

Титова Алина Сергеевна,
к.т.н.,
Акционерное общество «Научно-исследовательский
институт точных приборов», старший научный
сотрудник лаборатории тепловых режимов

Ведущая организация Федеральное казённое предприятие «Научно-
испытательный центр ракетно-космической
промышленности» г. Пересвет

Защита диссертации состоится 28 декабря 2021 года в 9-00 часов на заседании диссертационного совета Д212.125.10, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», Волоколамское ш., д. 4, г. Москва, А-80, ГСП-3, 125993

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»,
https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=161159

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.т.н., доцент



Денискина Антонина Робертовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Среди различных видов тепловых испытаний космических аппаратов (КА) особое место по важности, сложности, трудоёмкости, связанной с расходом больших материальных ресурсов, занимают тепловакуумные испытания, отличительной особенностью которых является моделирование в экспериментальных установках космических условий полёта или условий пребывания на поверхности не имеющих атмосферы небесных тел (Луна, астероиды). При проведении таких испытаний в экспериментальной установке моделируется воздействие факторов космической среды непосредственно влияющих на тепловое состояние аппарата, таких как: высокий вакуум, электромагнитное излучение Солнца, тепловое излучение небесных тел, вблизи которых или на поверхности которых находится аппарат, а также радиационные свойства космического пространства («чернота» и «холод»).

На базе достижений вакуумной и криогенной техники, оптики, светотехники, теплотехники и других прикладных наук созданы системы, с приемлемой точностью моделирующие в наземных экспериментальных установках космический вакуум и радиационные свойства космического пространства. Разработаны средства приближенного моделирования воздействия на поверхность КА излучения, исходящего от планет и их спутников. Можно считать, что моделирование в наземных экспериментальных установках воздействия перечисленных факторов космической среды на тепловое состояние КА уже не является проблемой. Также не является проблемой и моделирование непосредственного теплового воздействия потока солнечного излучения на поверхность КА при неизменной его ориентации относительно направления на Солнце.

Однако при штатной эксплуатации КА часто возникают ситуации, которые невозможно воспроизвести с помощью имеющихся имитационных средств. Например, космический аппарат, если он по программе полёта не находится в

режиме постоянно-солнечной ориентации, подвергается воздействию переменных по времени и пространственной ориентации лучистых полей, источником которых может быть и Солнце, и тепловое излучение небесных тел, вблизи которых он находится.

В этом случае проведение тепловакуумных испытаний КА в условиях, максимально приближенным к натурным, является трудноразрешимой задачей. В связи с этим актуальными становятся исследования по двум направлениям совершенствования методологии технологии тепловой отработки КА:

1. Реализация концепции поотсечной тепловой отработки крупноразмерных аппаратов.

2. Достаточно точное воспроизведение требуемых тепловых нагрузок на поверхность КА с помощью уже созданных и только разрабатываемых упрощённых имитационных средств на основе использования инфракрасных источников излучения.

В настоящее время особенно важна задача получения достоверных результатов при минимально возможных затратах.

Для приближенного моделирования тепловых нагрузок на поверхность КА широко используются так называемые инфракрасные имитаторы, представляющие собой системы инфракрасных автономно управляемых источников излучения, размещаемых вокруг испытуемого объекта. К таким системам предъявляются следующие противоречивые требования:

- для повышения точности моделирования тепловых нагрузок число источников излучения должно быть, по возможности, большим;
- число каналов управления источниками излучения должно быть минимальным.

Для удовлетворения этим требованиям актуальной является задача конструирования инфракрасного имитатора с минимально допустимым количеством автономно «запитываемых» модулей, а также разработки методического обеспечения управления его энергетическими характеристиками.

Степень разработанности темы. Исследованию и разработке методов моделирования тепловых нагрузок на поверхность КА посвящены работы Колесникова А.В., Болотной К.И., Палешкина А.В., Сыздыкова Ш.О. и др., а также зарубежных авторов Цао Чжисун, Пи Ифен, Лю Шоувэнь, Ван Цзин, Гэри С.Эш., Кацхофф С и др.

При выборе и разработке методов исследований в области испытаний космических аппаратов в диссертации учтены основные достижения коллективов АО «НПО им. С.А. Лавочкина», ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», ФКП «НИЦ РКП» и других организаций. В частности, посвящённые исследованию и разработке методов моделирования тепловых нагрузок на поверхность космических аппаратов, в которых рассматривались методы оптимизации режима работы инфракрасных имитаторов, и были созданы предпосылки для использования совокупности сетчатых нагревателей как единой системы моделирования внешних расчётных тепловых нагрузок с заданной точностью.

Цель работы.

Разработка методического обеспечения экспериментального моделирования тепловых нагрузок на поверхность космического аппарата в инфракрасных имитаторах с блочными линейчатыми излучателями для повышения точности моделирования и упрощения системы управления энергетическими характеристиками имитаторов.

Основные решаемые в работе задачи.

1. Исследование возможности и целесообразности моделирования внешнего теплообмена космических аппаратов, функционирующих не в режиме постоянной солнечной ориентации, в условиях максимально приближенным к натурным.

2. Разработка принципиальной схемы и методики определения режима работы инфракрасного имитатора модульного типа с линейчатыми излучателями, скомпонованными в компактные блоки (модули).

3. Определение условий обеспечения приемлемой точности моделирования расчётных внешних тепловых нагрузок на поверхность КА с помощью инфракрасных имитаторов с дискретно расположенными излучателями.

4. Разработка радиационной модели трубчатой кварцевой лампы накаливания с вольфрамовой спиралью для исследования вопроса об иерархическом положении таких ламп в ряду других источников излучения, потенциально пригодных для использования в инфракрасных имитаторах.

Научная новизна.

1. Разработана новая принципиальная схема инфракрасного имитатора модульного типа с блочными линейчатыми излучателями.

2. Разработана методика определения оптимального энергетического режима работы инфракрасного имитатора модульного типа с блочными линейчатыми излучателями.

3. Разработана радиационная модель трубчатой кварцевой лампы накаливания с вольфрамовой спиралью.

4. Выявлены причины появления недопустимо больших погрешностей моделирования тепловых нагрузок на поверхность космического аппарата при использовании трубчатых кварцевых ламп накаливания.

Теоретическая значимость работы определяется её научной новизной.

Практическая значимость работы.

Разработанная методика оптимизации энергетических режимов работы имитаторов модульного типа с блочными линейчатыми излучателями использовалась в АО «НПО им. С.А. Лавочкина» при подготовке рабочих программ проведения автономных тепловакуумных испытаний в вакуумной камере ВК-27 с использованием системы сетчатых нагревателей отдельных фрагментов создаваемых на предприятии изделий.

Материалы диссертации являются результатом авторских исследований, проводимых на кафедре 610 «Управление эксплуатацией ракетно-космических систем» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» в рамках государственного задания в сфере научной деятельности по научному проекту № FSFF-2020-2016, выполняемого при финансовой поддержке Минобрнауки России.

Объектом исследования в данной работе являются математические модели лучистого теплообмена в сложных технических системах, методы моделирования условий внешнего теплообмена КА, методы оптимизации режимов работы технических систем.

Методология и методы исследования.

Для решения поставленных в диссертации задач использовались:

- аналитические и численные методы математического моделирования;
- методы теории теплообмена излучением для расчёта теплообмена между элементами поверхности испытываемых объектов и излучающими элементами имитаторов внешних тепловых нагрузок;
- градиентные методы оптимизации целевых функций (метод наискорейшего спуска и метод сопряжённых градиентов) при определении энергетических режимов работы имитаторов.

Для разработки программ для ЭВМ и проведения вычислительных экспериментов использовался FORTRAN.

Основные результаты диссертационной работы, выносимые на защиту:

1. Принципиальная схема работы инфракрасного имитатора модульного типа с блочными линейчатыми излучателями.
2. Методика определения оптимального энергетического режима работы инфракрасного имитатора модульного типа с блочными линейчатыми излучателями.

3. Радиационная модель трубчатой кварцевой лампы накаливания с вольфрамовой спиралью.

4. Результаты вычислительных экспериментов.

Достоверность и обоснованность результатов работы.

Достоверность полученных в диссертации результатов подтверждается удовлетворительным совпадением результатов вычислительных экспериментов, проведённых с использованием разработанных методик, вычислительных алгоритмов и компьютерных программ, с результатами физических экспериментов, полученными в АО «НПО им. С.А. Лавочкина» при проведении автономных тепловакуумных испытаний отдельных фрагментов разрабатываемых изделий.

Все изложенные в диссертации результаты получены лично автором, либо при его непосредственном участии.

Апробация работы.

Представленные в диссертации результаты докладывались на XLIV Молодежной международной научной конференции “Гагаринские чтения” (Москва, 2018 г.), XXV научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов “Вакуумная наука и техника” (Судак, 2018 г.), XLIV академических чтениях по космонавтике, посвященных памяти С.П. Королёва – пионеров освоения космического пространства (Москва, 2020 г.), XLII Международной научно-практической конференции “World Science: problems and innovation” (Пенза, 2020), XXVIII научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов “Вакуумная наука и техника” (Судак, 2021 г.)

Публикации.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 3-х статьях, из них 2 – в журналах, входящих в Перечень ВАК, 1 – в издании, цитируемом международной базой SCOPUS, а также в 5-ти трудах и материалах научных конференций.

Структура и объем работы.

Диссертация объёмом 111 страниц состоит из введения, 4 глав, заключения, списка использованных источников из 69 наименований; содержит 25 рисунков и 3 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, приведён предварительный анализ возможных подходов к решению задачи физического моделирования условий внешнего теплообмена КА при его тепловакуумной отработке, сформулированы цель диссертации, задачи, решаемые в ходе работы, и положения, выносимые на защиту. Показаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методология и методы исследования, степень разработанности темы исследования. Также содержится информация о степени достоверности и апробации результатов исследования.

В первой главе выполнен анализ перспектив реализации концепции экспериментальной отработки теплового режима КА в тепловакуумных установках, где условия внешнего теплообмена моделировались бы с максимально достижимой точностью. Проанализированы методы и средства моделирования космического вакуума, радиационных свойств космического пространства, электромагнитного излучения Солнца. По результатам анализа отмечено, что экспериментальное моделирование влияния космического вакуума, радиационных свойств космического пространства, нежесткого электромагнитного излучения Солнца на КА, являются вполне решаемыми с приемлемой точностью задачами, но моделирование совместного воздействия переменных по времени и ориентации полей излучения, исходящего от Солнца, планет и частей самого космического аппарата, не вошедших в состав испытуемого объекта, во многих случаях является практически неразрешимой задачей.

В связи с проблемами, которые возникают при реализации концепции проведения тепловакуумных испытаний КА в экспериментальных установках,

где моделируются условия внешнего теплообмена, приближающиеся к натурным, важное значение приобретают приближенные методы воспроизведения расчётных значений внешних тепловых нагрузок с помощью инфракрасных источников излучения, что в совокупности с системами вакуумирования и системой криогенных экранов, моделирующих «холодный» и «черный» космос, позволяет воспроизводить с приемлемой точностью влияние внешнего теплообмена на тепловое состояние КА. Совокупность инфракрасных источников излучения, объединённых в определённой конструкции, называют инфракрасными имитаторами.

В результате с соответствующим обоснованием сформулированы основные требования к конструкции и излучающим элементам инфракрасных имитаторов.

Вторая глава посвящена анализу характеристик известных средств приближенного моделирования внешних тепловых нагрузок на поверхность КА. Проанализированы достоинства и недостатки инфракрасных имитаторов модульного типа с условно линейчатыми излучателями, имитаторов на основе трубчатых ламп накаливания, инфракрасных имитаторов с условно точечными излучателями, термоэкранов, термоэкранов в сочетании с системой галогенных ламп накаливания, сетчатых нагревателей, поверхностных управляемых электронагревателей.

Показано, что важное значение имеют приближенные методы моделирования внешнего теплообмена КА с помощью инфракрасных источников излучения.

Третья глава диссертации посвящена исследованию методов определения оптимальных энергетических режимов работы инфракрасных имитаторов.

При использовании инфракрасных имитаторов возникает сложная задача управления их энергетическими характеристиками, заключающаяся в определении и реализации таких режимов эксплуатации излучающих элементов имитатора, при которых расчётные внешние тепловые нагрузки

воспроизводились бы наилучшим образом, разумеется, в рамках возможностей применяемой имитационной системы.

В качестве критерия оптимальности режима работы имитатора в известных работах принимается минимум целевой функции ψ , представляющей собой сумму квадратов «взвешенных» погрешностей Δq_i воспроизведения расчётных значений q_i^0 внешних тепловых потоков к выделенным тепловоспринимающим элементам. Величина Δq_i равна разности между плотностью потока q_i излучения, поглощаемого i -ым элементом в условиях экспериментальной установки и заданным значением плотности теплового потока q_i^0 , подводимого по расчётам к выделенным элементам в штатных условиях эксплуатации. При этом

$$q_i = \sum_{j=1}^n \pi \cdot A_{di-j} \cdot \Phi(\vec{r}) \cdot \varphi_{di-j} \cdot J_j(0),$$

где A_{di-j} – интегральная поглощательная способность i -го элемента по отношению к излучению j -го излучателя;

φ_{di-j} – локальный угловой коэффициент i -го элемента и j -го излучателя

$\Phi(\vec{r})$ – индикатриса излучения;

\vec{r} – единичный вектор, направленный от j -го излучателя к i -му элементу;

n – число излучателей.

Вид функции ψ , являющейся функцией n переменных $J_1(0), J_2(0), \dots, J_n(0)$ определяется следующим выражением

$$\psi(J_1(0), J_2(0), \dots, J_n(0)) = \sum_{i=1}^N b_i^2 \left(\sum_{j=1}^n \pi \cdot A_{ij} \cdot \varphi_{di-j} \cdot \Phi(\vec{r}) \cdot J_j(0) - q_i^0 \right)^2.$$

Для определения оптимальных значений $J_j(0)$ решается задача минимизации функции ψ как функции n переменных $J_j(0)$ $j = 1, 2, \dots, n$ при следующих естественных ограничениях на искомые величины $J_j(0)$:

$$J_j(0) \geq 0, \quad J_j(0) \leq J_{MAX},$$

где J_{MAX} – максимально допустимая величина интенсивности излучения, зависящая от типа излучателей.

Известны два методических подхода к определению минимума целевой функции: экстремальный и градиентный.

Экстремальный метод основан на использовании необходимого условия существования экстремума функции многих переменных ($\frac{\partial \psi}{\partial J_k} = 0, k = 1, 2, \dots, n$). Используя это условие, получают так называемую нормальную систему линейных уравнений относительно неизвестных $J_j(0)$, которая решается при отмеченных выше ограничениях. В связи с необходимостью учёта этих ограничений система решается итерационным методом.

Второй подход к решению задачи определения оптимального режима работы инфракрасных имитаторов основан на использовании градиентных методов минимизации целевой функции ψ , а именно – метода наискорейшего спуска и метода сопряжённых градиентов, при использовании которых применяется итерационный алгоритм оптимизации вектора $J(0)$.

Одной из особенностей решаемой задачи является то, что коэффициенты $A_{i,j}$, входящие в выражение для целевой функции, зависят не только от характера распределения по λ спектральной поглотательной способности A_λ покрытий тепловоспринимающих элементов, но и характера распределения по λ спектральной интенсивности излучения J_λ каждого j -го модуля имитатора. Заметим, что $J_\lambda = f(\lambda, T, \varepsilon_\lambda)$, где ε_λ - спектральная степень черноты излучателя модуля, T - его температура. Поскольку значения $J_j(0)$ могут быть самыми различными, то для покрытий, не являющихся серыми, будут отличаться и коэффициенты $A_{i,j}$ для одних и тех же тепловоспринимающих элементов. По сути дела, коэффициенты $A_{i,j}$ являются функцией искомых величин $J_j(0)$. Однако имеющееся и широко используемое методическое и программное обеспечение решения задачи выбора режимов работы инфракрасных имитаторов различного типа основывается на упрощающем предположении о постоянстве

спектральной поглотительной способности A_λ покрытий тепловоспринимающих элементов испытуемого объекта во всей полосе спектра падающего от имитатора излучения. То есть обычно в выражение для целевой функции ψ вводятся не значения коэффициентов $A_{i,j}$ (двумерный вектор), а значения коэффициентов \bar{A}_i (одномерный вектор), представляющих собой совокупность значений поглотительной способности тепловоспринимающих элементов по отношению к излучению, испускаемому в средней и дальней инфракрасной области спектра. По сути, коэффициенты \bar{A}_i принимаются равными ε_i - интегральной степени черноты тепловоспринимающих элементов ($i = 1, 2, \dots, N$). Возможность такой замены при определённых обстоятельствах следует из упрощённой и часто практически используемой трактовки закона Кирхгофа – если в какой-то полосе спектра тело хорошо излучает, то в этой же полосе спектра оно и хорошо поглощает падающее на него излучение. Но опыт решения задач, связанных с поиском оптимальных режимов работы инфракрасных имитаторов, показывает, что значения интенсивности излучения модулей имитатора, определяемые по известным методикам и обеспечивающие минимум целевой функции, могут изменяться в широких пределах. Следовательно, и диапазон длин волн, где находится значимая часть энергии излучения имитатора, весьма широк. В связи с этим в случае, когда наружные поверхности КА по радиационным свойствам не являются серыми, необходима корректировка известных методик решения задачи выбора оптимальных режимов работы инфракрасных имитаторов, используя итерационный процесс поиска решения задачи, заключающийся в многократном определении вектора $J(0)$ путём минимизации целевой функции ψ и одновременном уточнении значений коэффициентов $A_{i,j}$ на основании полученных на каждой итерации значений вектора $J(0)$. То есть сначала задаются нулевые приближения коэффициентов $A_{i,j}$, а затем, минимизируя функцию ψ , вычисляется первое приближение вектора $J(0)^{(1)}$. Используя полученный результат, вычисляются

первые приближения коэффициентов $A_{i,j}^{(1)}$ и ε_j . Для вычисления этих коэффициентов применяют известные из теории теплообмена излучением соотношения. Итерационный процесс продолжается до тех пор, пока последующие приближения не станут незначительно отличаться от предыдущих.

В четвертой главе представлены результаты исследований по проблеме создания инфракрасного имитатора модульного типа с линейчатыми излучателями, скомпонованными в отдельные автономно управляемые блоки. В качестве излучателей могут применяться нагреваемые электрическим током провода, различные трубчатые лампы накаливания, керамические трубчатые нагреватели. Необходимость создания такого имитатора следует даже из анализа достоинств и недостатков сетчатых излучателей, используемых при проведении автономных тепловакуумных испытаний отдельных элементов космических аппаратов с преимущественно плоскими внешними поверхностями. Сетчатый нагреватель – это сугубо частный вариант исполнения блочного модуля с условно линейчатыми излучателями. Сетчатые нагреватели, выполненные в виде совокупности параллельно расположенных и нагреваемых электрическим током проводов, устанавливаются в непосредственной близости от тех участков поверхности испытываемого объекта, на которые они должны воспроизводить расчётные внешние тепловые нагрузки. Обладая рядом достоинств, например, такими как простотой в изготовлении и эксплуатации, незначительным экранированием облучаемой поверхности, сетчатые излучатели в то же время имеют серьёзный недостаток, чрезвычайно ограничивающий область их применения: каждый излучатель должен участвовать в облучении лишь той поверхности, в непосредственной близости от которой он находится. Пересечение областей их лучистого воздействия приводит к появлению погрешностей моделирования облучённости испытываемого объекта с неплоской формой наружной поверхности. Если сетчатые нагреватели включить в состав имитатора модульного типа, установив их вокруг испытываемого объекта на существенном от него расстоянии с тем, чтобы каждый модуль мог

участвовать в облучении различных по ориентации и расположению тепловоспринимающих элементов испытуемого объекта, то полученный имитатор будет обладать широкими функциональными возможностями.

В обеспечение создания такого имитатора в диссертационной работе решались следующие задачи:

1. Устанавливалась зависимость плотности падающего на элемент испытуемого объекта теплового потока от подводимой к модулю электрической мощности и его геометрических параметров.

2. Выявлялся оптимальный в отношении точности воспроизведения заданных внешних тепловых нагрузок закон распределения подводимой к модулям электрической мощности.

Геометрическая модель имитатора представлена на рисунке 1.

Предполагается, что на цилиндрической и торцевой ажурных, но достаточно жёстких поверхностях размещаются однотипные сетчатые излучатели (модули). Допустим, число параллельно расположенных проводов в модуле равно N . Чтобы в модуле была центральная нить, число N должно быть нечетным. Середину центральной нить будем считать центральной точкой модуля. Предположим, что на боковой поверхности цилиндрической части каркаса имитатора модули располагается так, что их нить параллельны образующим прямым каркаса имитатора, а центральные нити лежат на самом каркасе. У торцевых модулей центральные точки размещаются на концентрических окружностях разного диаметра, но с одинаковым угловым шагом. Расположение каждого j -го сетчатого модуля определим цилиндрическими координатами центральных их точек в связанной с каркасом имитатора системе координат (R_j, γ_j, Z_j) . Тогда середина каждого k -го излучающего элемента этого модуля (провода длиной l) в связанной с каркасом имитатора системе координат будет иметь следующие координаты

$$r_k = \sqrt{R_j^2 + \left(\frac{b}{2} - ((k-1)\Delta b)\right)^2},$$

где $k \in [1; N]$, N – число параллельных нитей в модуле;

$$\gamma_k = \gamma_j - \arctg\left(\frac{b/2 - (k-1) \cdot \Delta b}{R_j}\right) \text{ при } k \in [1; \frac{N+1}{2}];$$

$$\gamma_k = \gamma_j + \arctg\left(\frac{(k - \frac{N+1}{2}) \Delta b}{R_j}\right) \text{ при } k \in [\frac{N+1}{2} + 1; N].$$

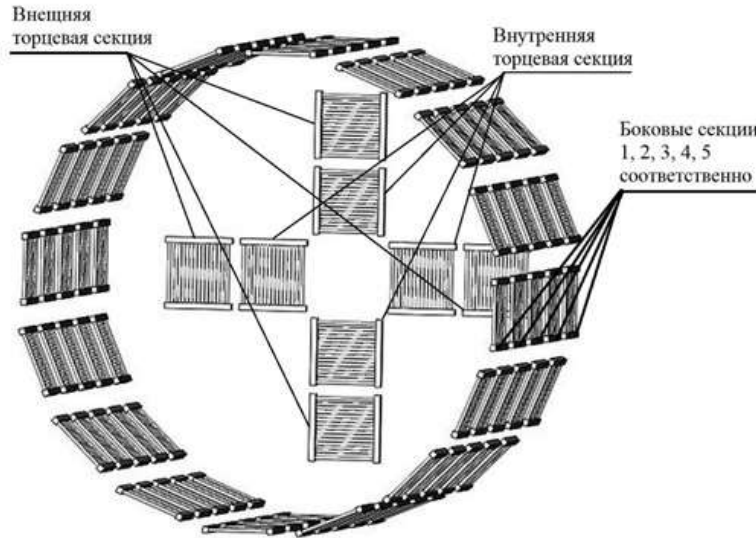


Рисунок 1 – Геометрическая модель имитатора (представлена без каркаса)

Плотность теплового потока q_i , приходящего на некоторый тепловоспринимающий элемент dF_i испытуемого объекта от какого-то j -го сетчатого модуля определяется простым выражением

$$q_i = \varepsilon \cdot \pi \cdot I_j \cdot \varphi_{i-j}, \quad (1)$$

где φ_{i-j} – локальный угловой коэффициент i -го тепловоспринимающего элемента и j -го модуля. При этом $\varphi_{i-j} = \sum_{k=1}^N \varphi_{i-k}$. В этом выражении φ_{i-k} – угловой коэффициент между i -м тепловоспринимающим элементом и k -й нитью модуля.

Если обозначить через W_j величину мощности, подводимой к j -му модулю, то очевидно, что

$$W_j = \varepsilon \cdot \pi \cdot I_j \cdot \pi \cdot d \cdot N \quad (2)$$

С учётом соотношения (2) выражение для q_i примет другой более удобный для последующего решения задачи вид:

$$q_i = \frac{W_j \cdot \varphi_{i-j}}{\pi \cdot l \cdot d \cdot N}.$$

Используя соотношения (1) и (2), можно выразить I_j через W_j . Это позволит для оптимизации режима работы имитатора с сетчатыми модулями использовать те же методические подходы, что и для имитаторов модульного типа с линейчатыми или условно точечными излучателями.

Задачу определения оптимального в отношении точности воспроизведения заданных внешних тепловых нагрузок закона распределения подводимой к модулям электрической мощности решалась как одна из обратных задач теории управления тепловыми процессами в следующей постановке. Пусть $q^0 = (q_1^0, q_2^0, q_3^0, \dots, q_n^0)$ – вектор заданных значений плотности теплового потока в определённых точках поверхности испытуемого объекта, а вектор $W^0 = (W_1, W_2, \dots, W_m)$ – вектор управления. Координаты этого вектора представляют собой упорядоченную совокупность значений электрической мощности, подводимой к модулям сетчатого имитатора.

Вектор W^0 определялся из условия определённой согласованности вектора q^0 с вектором $q = (q_1, q_2, q_3, \dots, q_n)$ значений плотности тепловых потоков, поглощаемых тепловоспринимающими элементами испытуемого объекта в условиях облучения его модулями рассматриваемого имитатора. При этом

$$q_i = \sum_{j=1}^m \frac{W_j \cdot \varphi_{di-j}}{\pi \cdot d \cdot l \cdot N}.$$

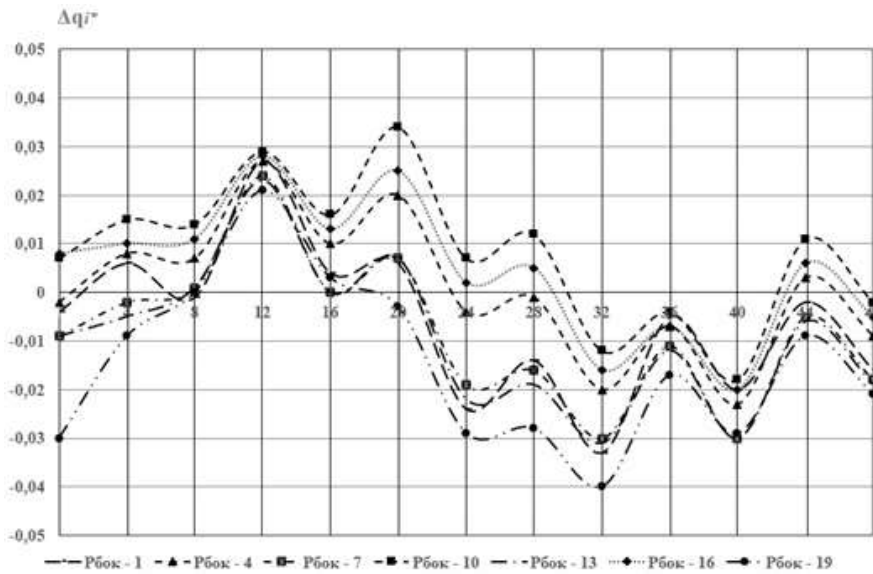
В качестве меры отклонения вектора q_i от вектора q_i^0 выбиралась среднеквадратичная невязка $\psi(W_1, W_2, \dots, W_m) = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^m \frac{W_j \cdot \varphi_{di-j}}{\pi \cdot d \cdot l \cdot N} - q_i^0 \right)^2$.

Решаемая задача сводится к минимизации функции $\psi(W^0)$ при следующих естественных физических ограничениях на искомые величины W_j : $W_j \geq 0$; $W_j \leq W_{MAX}$ при любых $j \in [1; m]$. Использовался итерационный алгоритм

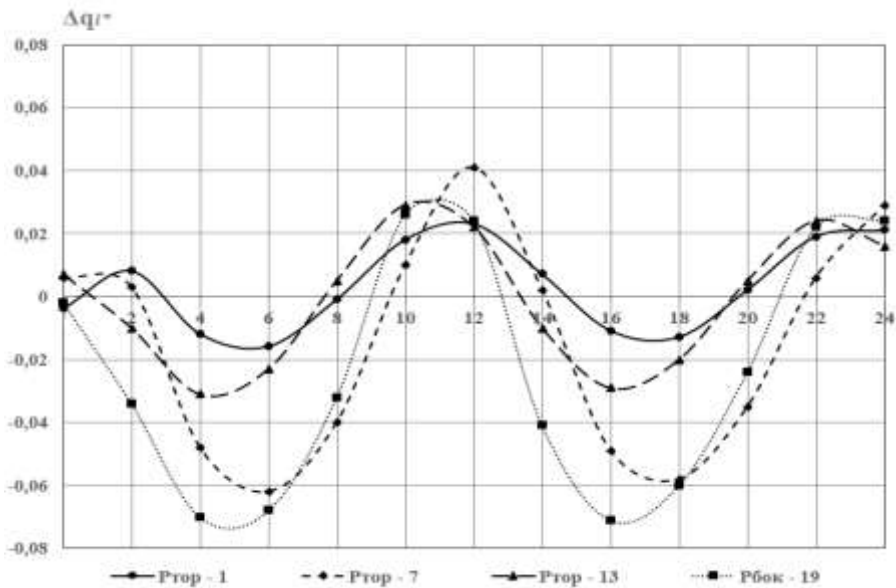
оптимизации вектора W_0 : $W_0^{(k+1)} = W_0^{(k)} + \Delta W_0^{(k)}$, где надстрочный индекс k – номер какого-то приближения. Начальное приближение искомого вектора можно задавать в значительной степени произвольно.

Разработанный и представленный в диссертационной работе метод моделирования тепловых нагрузок на поверхность КА в имитаторе с блочными сетчатыми или трубчатыми излучателями реализован в виде многомодульной компьютерной программы и использовался в вычислительных экспериментах для исследования возможностей данной имитационной системы в отношении точности моделирования внешних тепловых нагрузок на объекты с разной формой внешней поверхности.

Результаты вычислительных экспериментов (рисунок 2) показывают, что разработанный метод экспериментального моделирования тепловых нагрузок на внешние поверхности космических аппаратов с помощью имитаторов модульного типа на основе сетчатых излучателей позволяет с высокой точностью обеспечивать воспроизведение расчётных внешних тепловых нагрузок на взаимно незатеняемые поверхности в том числе и на поверхности околопланетных аппаратов, подвергающиеся одновременному воздействию потоков излучения, исходящих от Солнца и планеты. При этом представленный в работе метод моделирования тепловых нагрузок и его реализация в виде вычислительного алгоритма могут быть использованы в любых имитаторах модульного типа с излучателями, имеющими цилиндрическую форму поверхности.



а



б

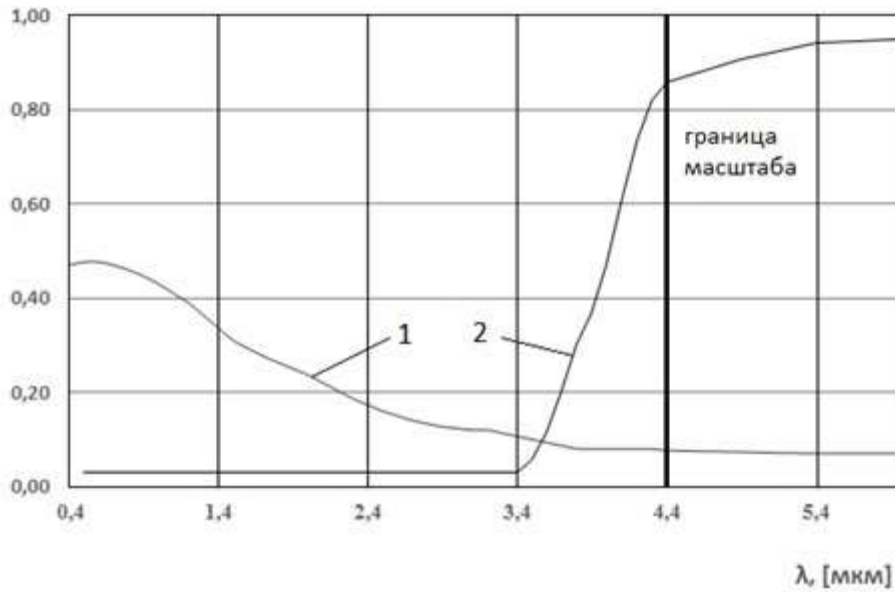
Рисунок 2 – Безразмерные погрешности моделирования расчётных тепловых нагрузок в точках поверхности цилиндрического испытываемого объекта в имитаторе с блочными сетчатыми излучателями. Точки расположены в определённых поясах сечений цилиндрической поверхности; а-боковая поверхность, б-торцевая поверхность

Очевидным является то, что при использовании в конструкции блочных модулей тонких нагреваемых электрическим током проводов, возникают сложности конструктивного и эксплуатационного характера (провисание

проводов при их нагреве, необходимость обеспечения их натяжения и т.п.). В связи с этим возникает вопрос о возможности использования в конструкции блочного модуля трубчатых ламп накаливания с вольфрамовой спиралью, в частности, галогенных.

Вольфрам, из которого изготавливаются излучатели большинства ламп накаливания, отличается от других материалов, претендующих на роль излучателей, особым характером зависимости спектральной степени черноты ϵ_λ от длины волны λ излучения. В видимой области спектра ϵ_λ вольфрама в широком температурном диапазоне находится в пределах диапазона (0,4; 0,45) мкм. Но по мере увеличения λ его спектральная степень черноты уменьшается и при $\lambda = 4$ мкм составляет уже величину, не превышающую 0,1, а в дальней инфракрасной области спектра ($\lambda > 10$ мкм) величина ϵ_λ снижается до уровня 0,05. Можно сказать, что вольфрам являясь хорошим материалом для излучающих спиралей осветительных ламп, неплохим материалом спиралей ламп, предназначенных для создания тепловых потоков большой плотности, но, в то же время, является плохим материалом излучателей, предназначенных для воспроизведения лучистых потоков, основная часть энергии которых находится в средней и дальней инфракрасной области спектра.

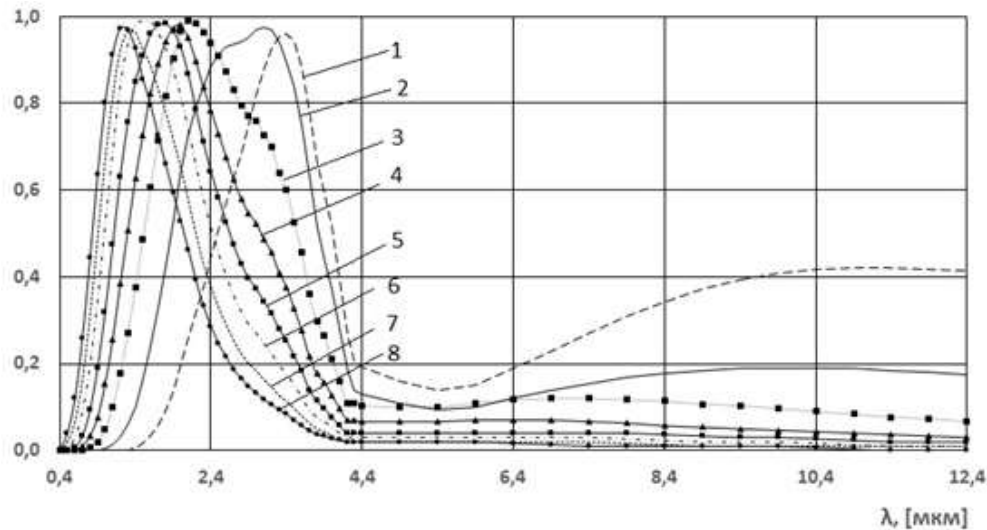
Используя известные данные о спектральных характеристиках вольфрама и кварцевого стекла, была составлена радиационная модель лампы и на основе этой модели определялись радиационные характеристики лампы в целом как функции температуры вольфрамовой спирали.



1 – вольфрамовая спираль $\varepsilon_{\lambda,w}$, 2 – кварцевая колба $\varepsilon_{\lambda,kolb}$

Рисунок 3 – Используемая модель спектральной степени черноты

На основе этих характеристик осуществлялся расчёт зависимости плотности уходящего с поверхности лампы интегрального потока излучения от температуры спирали $q_{lamp}(T_w)$. Оказалось, что из-за особенности характера зависимости спектральной степени черноты вольфрама от длины волны излучения требуемая плотность потока уходящего от лампы излучения может быть получена только при высоких значениях температуры спирали. Под требуемой плотностью понимается плотность потока излучения лампы, при которой имитатор, выполненный в виде совокупности размещаемых вокруг испытуемого объекта ламп, в состоянии обеспечить подвод к поверхности объекта тепловых потоков определённой плотности.



1 – 600, 2 – 800, 3 – 1000, 4 – 1200, 5 – 1400, 6 – 1600, 7 – 1800, 8 – 2000 [K]

Рисунок 4 – Относительная величина спектральной плотности потока, исходящего с поверхности лампы излучения - $\bar{q}_{\lambda, lamp}(\lambda, T_w)$ при $\bar{d} = 0,5$

И конструктивные и радиационные элементы инфракрасного имитатора не должны в заметной степени затенять криогенные экраны экспериментальной установки от излучения, исходящего от испытуемого объекта, а также от имитационных систем экспериментальной установки, в частности, от самого инфракрасного имитатора. Поэтому излучающие элементы имитатора должны размещаться с определённой дискретностью, которую можно характеризовать отношением расстояния между соседними излучателями к их ширине. Если обозначить это отношение через n и воспользоваться результатами расчёта $q_{lamp}(T_w)$, то можно оценить зависимость осреднённой величины плотности потока излучения, уходящего с поверхности имитатора ($q_{имит}$) с ламповыми модулями, от температуры спирали при различных значениях n .

Результаты расчёта $q_{имит}$ как функции T_w относились к характерной величине S , где S – солнечная постоянная. Полученные зависимости безразмерной величины $\bar{q}_{имит}(T_w) = q_{имит}(T_w) / S$ от температуры спирали $T_w \in [600; 2000] K$ при $n = \{10, 20, 30\}$ представлены на рисунке 5.

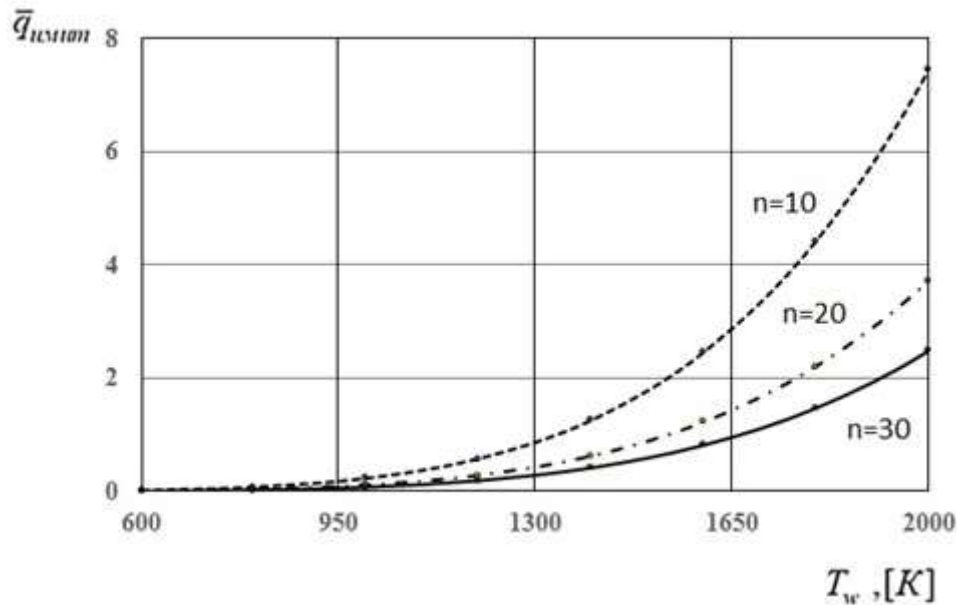


Рисунок 5 – Зависимости безразмерной величины $\bar{q}_{имит}(T_w) = q_{имит}(T_w)/S$ от температуры спирали

Учитывая сильную зависимость величины $q_{имит}$ от параметра n , возникает вопрос о том, на какие значения этого параметра следует ориентироваться при оценке возможного уровня погрешностей моделирования внешних тепловых нагрузок на элементы поверхности КА с неоднородными поглощательными свойствами. В конструкциях известных инфракрасных имитаторов чаще всего реализуются значения $n \in [10; 30]$. При использовании в имитаторе большого количества ламп усложняется система управления имитатором. Поэтому в имитаторе с ламповыми модулями представляется целесообразным принимать значение параметра n не ниже 20. Но как следует из графиков на представленном выше рисунке при $n = 20$ величина плотности теплового потока, превышающая значение 1400 Вт/м^2 может быть достигнута только при $T_w > 1500 \text{ К}$. Для некоторых используемых в космической технике материалов и покрытий чрезмерно большие погрешности моделирования могут возникать даже при сравнительно невысоких значениях температуры спирали – не выше 1200 К . Так, например, для белой эмали и кварцевого стекла относительные погрешности, обусловленные несоответствием спектров излучения лампы и источника

внешнего теплового нагружения, уже при $T_w=1200$ К достигают по модулю величину 0,5, что, очевидно, является недопустимым.

Таким образом, неблагоприятный для использования в инфракрасных имитаторах характер зависимости спектральной степени черноты вольфрамовой спирали от длины волны излучения порождает сомнения в целесообразности использования очень удобных в эксплуатации трубчатых кварцевых ламп накаливания, в частности галогенных, в инфракрасных имитаторах внешних тепловых нагрузок. В связи с этим заслуживают внимания лампы-термоизлучатели, а также трубчатые керамические излучатели несмотря на их явный недостаток, заключающийся в тепловой инерционности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённого исследования разработано методическое обеспечение экспериментального моделирования тепловых нагрузок на поверхность космического аппарата в инфракрасных имитаторах с блочными линейчатыми излучателями. Это позволит повысить точность моделирования тепловых нагрузок и упростить систему управления энергетическими характеристиками имитаторов.

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи, изложены новые научно обоснованные технические решения и разработки, имеющие существенное значение для развития ракетно-космической отрасли в части тепловых испытаний космических аппаратов.

Показано, что в связи с проблемами, возникающими при моделировании в экспериментальных установках условий внешнего теплообмена КА, не имеющего при штатной эксплуатации определённой и постоянной ориентации на Солнце, целесообразно внешние тепловые нагрузки на его поверхность моделировать с помощью инфракрасных имитаторов. Это позволит в совокупности с системой вакуумирования и системой криогенных экранов установки, моделирующих «холодный» и «чёрный» космос, воспроизводить

влияние внешнего теплообмена на тепловое состояние КА с приемлемой точностью.

Предложена принципиальная схема, и разработана методика определения оптимального энергетического режима работы инфракрасного имитатора модульного типа с блочными условно линейчатыми излучателями. При реализации и использовании предложенной методики существенно повысится точность экспериментального моделирования внешних тепловых нагрузок на поверхность космических аппаратов за счёт приближения спектра излучения модулей имитатора к спектру излучения серых тел в длинноволновой инфракрасной области спектра. Кроме этого упростится система управления имитатором за счёт многократного снижения числа каналов управления его модулями.

Определены условия обеспечения приемлемой точности моделирования расчётных внешних тепловых нагрузок на поверхность КА с помощью инфракрасных имитаторов с дискретно расположенными излучателями. При неоднородности поверхности испытуемого объекта по радиационным свойствам её элементов необходима корректировка известных методик решения задачи выбора оптимальных режимов работы инфракрасных имитаторов путём организации итерационного процесса поиска решения задачи. Отличительной особенностью этого процесса является многократное определение вектора управления имитатором (вектора интенсивности излучения модулей имитатора) и одновременное уточнение на каждой итерации значений поглощательной способности элементов поверхности испытуемого объекта по отношению к излучению, исходящему от каждого модуля.

Разработана радиационная модель трубчатой кварцевой лампы накаливания с вольфрамовой спиралью. С помощью этой модели исследован вопрос об иерархическом положении таких ламп в ряду других источников излучения, потенциально пригодных для использования в инфракрасных имитаторах.

На основе разработанной радиационной модели трубчатой кварцевой лампы накаливания с вольфрамовой спиралью установлено, что неблагоприятный в инфракрасной области спектра характер зависимости спектральной степени черноты вольфрама от длины волны излучения может приводить к появлению недопустимо больших погрешностей моделирования внешних тепловых нагрузок на поверхность космического аппарата при использовании этих ламп в инфракрасных имитаторах.

Список опубликованных работ по теме диссертации

Публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК.

1. Колесников А.В., Палешкин А.В., Шеметова Е.В. Имитаторы тепловых нагрузок с диффузно излучающими модулями в строго ограниченном телесном угле // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2018, № 4 (121). – С. 47–54.

2. Палешкин А.В., Заговорчев В.А., Шеметова Е.В. Предпосылки создания блочного имитатора на основе сетчатых нагревателей для проведения тепловой отработки // Тепловые процессы в технике. 2021, Т.13, № 9. – С. 418-423.

Публикация в издании, цитируемом международной базой SCOPUS.

3. Tushavina O.V., Shemetova E.V., Kolesnikov A.V., Paleshkin A.V The area of rational use of tubular incandescent lamps in simulators of thermal loads on the surface of spacecraft // Journal of the Balkan Tribological Association. 2021, Vol. 27, No 4. – pp. 556-566.