



Сыздыков Шалкар Оразович

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ
НАГРУЗОК НА ПОВЕРХНОСТЬ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С
ПОМОЩЬЮ ИНФРАКРАСНЫХ ИЗЛУЧАЮЩИХ СИСТЕМ**

Специальность 05.07.03 – «Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов»

Автореферат

диссертация на соискание ученой степени

кандидат технических наук

Работа выполнена на кафедре «Управление эксплуатацией ракетно-космических систем» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: Колесников Анатолий Васильевич доктор технических наук, с.н.с., федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», кафедра «Управление эксплуатацией ракетно-космических систем», профессор.

Официальные оппоненты: Резник Сергей Васильевич, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», кафедра «Ракетно - космические композитные конструкции», заведующий кафедрой;

Финченко Валерий Семенович, доктор технических наук, Акционерное общество «Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина», ведущий научный сотрудник.

Ведущая организация: Акционерное общество «Корпорация ВНИИЭМ», г. Москва.

Защита состоится «24» октября 2019г. в 10-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.10 созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

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=105270

Автореферат разослан « ____ » _____ 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.125.10

кандидат технических наук, доцент  Денискина Антонина Робертовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Наземная отработка космической техники включает в себя большой объем экспериментальных работ по различным направлениям. Среди них важное место занимают тепловакуумные, вакуумно-температурные, комплексные электрические испытания. Особенностью этих видов испытаний является то, что они проводятся в условиях моделирования внешнего теплообмена космического аппарата (КА). При этом моделируются и внешние тепловые нагрузки, источником которых может быть электромагнитное излучения Солнца, тепловое излучения планет, а так же излучения тех частей КА, которые не вошли в состав испытуемого объекта (ИО) в основном по причине ограниченности размеров экспериментальной установки.

Для экспериментального моделирования воздействия на поверхность ИО внешних тепловых потоков используются имитаторы солнечного излучения, а также системы каких-либо других источников излучения, размещаемых вокруг ИО. В качестве этих источников применяют различные средства. Различные и по конструкции и по способу подвода энергии. Но они имеют общую особенность – основная энергия испускаемого ими излучения сосредоточена в средней и дальней инфракрасной полосе спектра с длиной волны, в основном превышающей 2-3 мкм, где спектральная поглощательная способность большинства наружных покрытий КА слабо зависит от длины волны падающего излучения. В этом заключается основное преимущество инфракрасных имитаторов перед другими. При необходимости моделирования ситуации, когда КА меняет свою ориентацию относительно направления на Солнце, дополнительные средства могут использоваться и для имитации воздействия на испытуемый объект потоков прямого солнечного излучения.

Но практическое применение инфракрасных имитаторов сопряжено с необходимостью выбора таких энергетических режимов их эксплуатации, при реализации которых обеспечивалась бы требуемая точность моделирования внешних тепловых нагрузок.

В крупных термовакуумных установках, оснащенных криогенными экранами, используемыми в качестве имитаторов «холодного» и «черного» космического пространства, а также вакуумными насосами основной откачки, моделирование внешних тепловых нагрузок осуществляется в основном с помощью инфракрасных имитаторов модульного типа с условно линейчатыми излучателями. Для таких имитаторов разработано и успешно используется достаточно эффективное методическое обеспечение их эксплуатации. Но существуют термовакуумные установки, в которых внешние тепловые нагрузки на ИО воспроизводятся либо с помощью излучающих панелей, в частности, с помощью термоэкранов, или с помощью галогенных ламп накаливания.

Режим работы таких средств обычно выбирается или с помощью приближенных интегральных оценок, или эмпирически, что не позволяет определить наилучший в отношении точности моделирования тепловых нагрузок режим работы используемых средств. Поэтому актуальной является задача разработки методического обеспечения эксплуатации отмеченных имитационных средств для определения таких энергетических режимов их работы, при котором достигается максимально возможная точность воспроизведения расчетных внешних тепловых нагрузок на ИО, разумеется, в рамках принципиальной возможности этих имитационных систем.

В термовакуумных установках, оснащенных термоэкранами, отсутствуют криогенные экраны, захолаживаемые жидким азотом. Минимальная температура термоэкранов обычно составляет -150°C . В связи с этим встает вопрос о степени влияния потоков фонового излучения, исходящего от термоэкранов, на тепловой режим ИО. Поэтому, помимо отмеченной, актуальной является и задача оценки влияния фонового излучения на тепловой режим ИО.

Степень разработанности темы. Методам моделирования внешних тепловых нагрузок посвящены работы авторов Палешкина А.В., Колесникова А.В., Болотной К.И., а так же зарубежных авторов Цао Чжисун, Пи Ифэй, Лю Шоувэнь, Инь Сяофан, Ван Цзин, Ведекинг Г.Л., Гэри С.Эш., Кацхофф С.

Методикам оценки влияния погрешностей моделирования внешних тепловых нагрузок на тепловое состояние КА посвящены работы Анфимова Н.А., Колесникова А.В.

Цель работы.

Целью диссертационной работы является разработка методического обеспечения экспериментального моделирования тепловых нагрузок на поверхность космического аппарата с помощью инфракрасных излучающих систем.

Основные решаемые в работе задачи.

1) Исследование способов моделирования в экспериментальных тепловакуумных установках нестационарных во времени и пространстве лучистых полей, формируемых одновременно и Солнцем и планетой.

2) Разработка методики расчета облученности элементов ИО в инфракрасных имитаторах внешних тепловых нагрузок с трубчатыми источниками излучения, в первую очередь галогенными лампами накаливания.

3) Разработка методики моделирования внешних тепловых нагрузок на КА в термобарокамерах, оснащенных термоэкранами и системой ГЛН.

4) Усовершенствование методики оценки влияния погрешностей моделирования внешних тепловых потоков на тепловой режим характерных элементов КА.

5) Выявить связь между погрешностями моделирования внешнего теплового потока и погрешностями в величине результирующего теплового потока через пакет реальной экранно-вакуумной теплоизоляции с различным числом экранов и при различной степени обжата пакета, характеризуемой величиной отношения кондуктивной и лучистой составляющих результирующего потока.

Научная новизна.

1) Разработан методический подход и алгоритм решения задачи оптимизации температурных режимов термоэкранов при испытаниях КА в

термобарокамерах, не оснащенных специальными имитаторами внешних тепловых нагрузок.

2) Разработана методика расчета облученности элементов ИО в имитаторах с трубчатыми источниками излучения.

3) Разработана методика определения оптимального энергетического режима имитатора, имеющего в своем составе термоэкраны и систему ГЛН.

4) Выявлена связь между погрешностями моделирования внешнего теплового потока и погрешностями в величине результирующего теплового потока через пакеты экранно-вакуумной теплоизоляции с различным числом экранов и при различной степени обжата пакета.

Практическое значение работы.

1) Разработанный методический подход и алгоритм решения задачи оптимизации температурных режимов термоэкранов используется во ВНИИЭМ при подготовке тепловакуумных испытаний КА в термовакuumной камере CLIMATS.

2) Усовершенствованная методика оценки влияния погрешностей моделирования внешних тепловых нагрузок на тепловое состояние КА позволила оценить влияние фонового излучения термоэкранов установки CLIMATS на тепловой режим характерных элементов КА, прототипами которых может служить КА «Михайло Ломоносов».

Объектом исследований данной работы являются математические модели теплообмена в сложных технических системах, и методы приближенного моделирования внешних тепловых нагрузок на КА.

Достоверность результатов работы. Подтверждается проведением вычислительных экспериментов с использованием разработанных программ и сравнения полученных результатов с результатами работ других авторов.

Апробация работы. Представленные в диссертации результаты докладывались на XLII Международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения» (Москва, апрель 2016), XLIII Международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения» (Москва, апрель

2017), XLIV Международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения» (Москва, апрель 2018).

Публикации.

Основные результаты работы опубликованы в 5 статьях в рецензируемых научных изданиях.

Структура и объем работы.

Диссертационная работа объемом 115 страниц состоит из введения, 3 глав, заключения и списка литературы из 78 наименований, содержит 23 рисунка и 3 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, отмечается новизна полученных результатов и обосновывается их достоверность.

В первой главе приводится краткая характеристика известных методов экспериментального моделирования внешнего теплообмена КА. В частности, обсуждаются перспективы проведения тепловакуумных испытаний КА в условиях максимально приближенных к натурным.

На основе проведенного анализа делается вывод о том, что экспериментальное моделирование тепловых режимов КА в условиях, максимально приближенных к натурным, сопряжено с большими и, во многих случаях, технически непреодолимыми трудностями, обусловленными, в первую очередь тем, что необходимо воссоздание в процессе проведения эксперимента переменных по времени и взаимной ориентации полей излучения, источниками которых является Солнце и планеты. Кроме того возникают сложности, связанные с моделированием в наземных условиях испытуемого объекта, а также трудности, связанные с тем обстоятельством, что крупные по габаритным размерам испытуемые объекты не могут быть размещены в экспериментальной установке.

В связи с этим важное значение приобретают приближенные методы моделирования внешнего теплообмена даже в установках, оснащенных

имитаторами солнечного излучения. Эти методы основаны на использовании инфракрасных источников излучения. В главе приводятся описания и анализ различных радиационно-оптических схем имитаторов, в которых реализуются приближенные методы моделирования воздействия на поверхность испытуемого объекта тепловых потоков, источником которых может быть Солнце, тепловое воздействие планет, кинетический нагрев потоком разреженного газа на невысоких околопланетных орбитах, а также излучение частей космического аппарата, не вмещающихся в рабочий объем экспериментальной установки. Основное внимание уделяется методам, реализованным в виде радиационно - оптических схем следующих имитаторов:

- 1) инфракрасные имитаторы модульного типа с условно линейчатыми и условно точечными излучателями;
- 2) термоэкраны (термочехлы);
- 3) термоэкраны в сочетании с системой галогенных ламп накаливания;
- 4) сетчатые нагреватели.

Вторая глава посвящена исследованию методов определения оптимальных энергетических режимов работы инфракрасных имитаторов различных типов.

Источники лучистого нагрева поверхности испытуемого объекта по принципу подвода энергии, геометрической форме, конструкции могут быть самыми различными. Но какие бы источники лучистых тепловых потоков не применялись для воспроизведения внешних тепловых нагрузок, всегда возникает необходимость в определении такого распределения подводимой к излучателям энергии, при которых в экспериментах достигается максимально возможная точность воспроизведения внешних тепловых нагрузок, разумеется, в пределах возможности применяемой излучающей системы.

В имитаторах модульного типа энергетический режим их работы характеризуется совокупностью значений интенсивности излучения его

элементов (модулей) в направлении своих нормалей - величинами $J_j(0)$ $j=1...n$, где n - число излучателей.

В качестве критерия оптимальности режима работы таких имитаторов рассматривается минимум целевой функции ψ , представляющей собой сумму квадратов “взвешенных” погрешностей Δq_i воспроизведения расчетных значений q_i^0 внешних тепловых потоков к выделенным тепловоспринимающим элементам испытуемого объекта. 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 расчетам к выделенным элементам в штатных условиях эксплуатации КА.

Для определения оптимальных значений $J_j(0)$ решается задача минимизации функции ψ как функции n переменных $J_j(0)$ $j=1,2...n$ при следующих ограничениях на искомые величины $J_j(0)$: $J_j(0) \geq 0$; $J_j(0) \leq J_{MAX}$, где J_{MAX} - максимально допустимая интенсивность излучения, зависящая от типа излучателей.

Известные методы минимизации целевой функции можно отнести к итерационным, с той лишь разницей, что минимизация целевой функции может осуществляться несколькими различными способами, хотя и мало отличающимися по сути: экстремальный, градиентный метод наискорейшего спуска, метод сопряженных градиентов.

Результаты исследований различных известных методов оптимизации энергетических режимов работы инфракрасных имитаторов модульного типа, полученные различными авторами, свидетельствуют о том, что градиентные методы и экстремальный метод, основанный на использовании необходимого условия существования экстремума функции многих переменных, дают мало отличающиеся результаты по точности моделирования расчетных внешних тепловых нагрузок, но положение точек минимума целевой функции у них

существенно отличаются. Это свидетельствует об отсутствии единственности решения рассматриваемой задачи.

Методические подходы и алгоритмы решений задач определения оптимальных режимов работы термоэкранов, термоэкранов в совокупности с галогенными лампами накаливания и имитаторов на основе сетчатых нагревателей в значительной степени отличаются от методов решения аналогичных задач для имитаторов модульного типа.

В термобарокамере, схематично изображенной на рисунке 1 и оснащенной термоэкранами (термочехлами) в качестве критерия оптимальности, как и в других задачах подобного типа, принимается минимум суммы квадратов “взвешенных” погрешностей воспроизведения заданных тепловых нагрузок на поверхности испытуемого объекта. Задача решается как обратная задача управления, в которой управляющие воздействия осуществляет система поддержания определенных температур на поверхности термоэкранов, а эффект управления определяется уровнем погрешностей воспроизведения заданных тепловых нагрузок или температур.

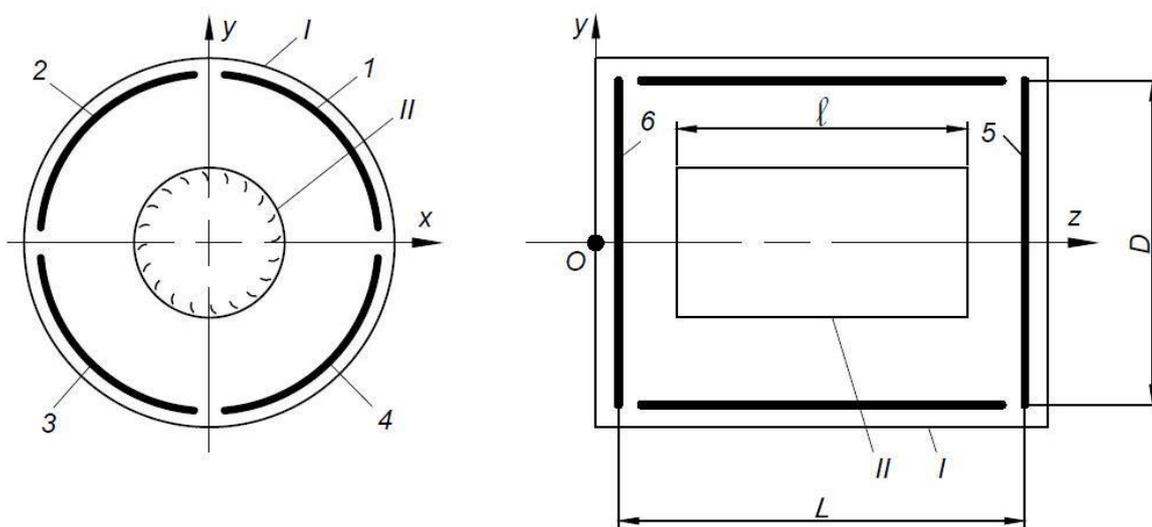


Рисунок 1 - Схема термобарокамеры I с четырьмя боковыми (1,2,3,4) и двумя торцевыми (5,6) термоэкранами. II – испытуемый объект

В качестве целевой (минимизируемой) функции рассматривалась функция ψ температур экранов T_j ($j=1,2,..n$). Эта функция может быть записана в виде

$$\psi(T_1, T_2, \dots, T_n) = \sum_{i=1}^N b_i^2 \left(\sum_{j=1}^n \varepsilon_j \sigma T_j^4 \cdot \phi_{di-j} \cdot A_{di-j} - q_i^0 \right)^2, \quad (1)$$

где q_i^0 - заданная величина плотности теплового потока, подводимого к i -ому тепловоспринимающему элементу ($i=1,2,..N$); ε_j - степень черноты поверхности экрана; σ - постоянная Стефана-Больцмана; ϕ_{di-j} - локальный угловой коэффициент i -го тепловоспринимающего элемента и j -го экрана ($j=1,2,..n$); A_{di-j} - поглощательная способность i -го тепловоспринимающего элемента по отношению к излучению j -го экрана (можно считать, что $A_{di-j} = \varepsilon_i$); b_i - весовой коэффициент для i -го тепловоспринимающего элемента ($i=1,2,..N$).

Для нахождения точки минимума целевой функции воспользуемся необходимым условием экстремума функции многих переменных

$$\frac{\partial \psi}{\partial T_j} = 0, \quad j = 1, 2, \dots, n.$$

Получим систему n нелинейных уравнений с n неизвестными при известных ограничениях на искомые величины $T_j \in [T_{\min}; T_{\max}]$. Но следует заметить, что целевую функцию ψ целесообразнее представлять как функцию значений плотности потоков излучения экранов, то есть как функцию величин $q_j = \varepsilon_j \sigma T_j^4$. В этом случае условие минимума целевой функции ψ принимает вид системы n линейных уравнений относительно неизвестных q_j , $j = 1, 2, \dots, n$.

$$\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^N b_i \cdot A_{di-j} \cdot A_{di-k} \cdot \phi_{di-j} \cdot \phi_{di-k} \cdot q_j = \sum_{i=1}^N b_i^2 \cdot A_{di-k} \cdot \phi_{di-k} \cdot q_i^0, \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

При этом на решения системы накладываются следующие ограничения:

$$q_j \in [q_{\min}; q_{\max}], \quad \text{где } q_{\min} = \varepsilon_j \cdot \sigma \cdot T_{\min}^4, \quad q_{\max} = \varepsilon_j \cdot \sigma \cdot T_{\max}^4.$$

В уравнения систем (1) и (2) входят локальные угловые коэффициенты каждого из N тепловоспринимающих элементов испытываемого объекта с каждым из n термоэкранов. Величины этих коэффициентов зависят от взаимного расположения и взаимной ориентации тепловоспринимающих элементов и экранов, а также от площади поверхности экранов.

Алгоритмы расчета этих угловых коэффициентов весьма просты, если в состоянии лучистого теплообмена находятся невогнутые тела.

В диссертации составлены геометрические модели экранов и испытываемого объекта, соответствующих схеме, представленной на рисунке 1.

Кратко описанный методический подход решения задачи оптимизации температурных режимов термоэкранов был реализован в виде многомодульной компьютерной программы. С использованием этой программы в вычислительных экспериментах оценивалась возможность моделирования характерных внешних тепловых нагрузок на поверхности космического аппарата с помощью 6 термоэкранов. В качестве испытываемого объекта рассматривался гипотетический цилиндрический отсек с диаметром d и длиной l .

Линейные размеры экранов и испытываемого объекта относились к диаметру D .

Относительная длина экранов $\bar{L} = L/D$ принималась равной 1,5. Относительный диаметр торцевых экранов принимался равным 1. Относительный диаметр испытываемого объекта $\bar{d} = d/D$ принимался равным 0,5, а относительная длина $\bar{l} = l/D$ предполагалась равной 0,75. Радиационно-оптические характеристики поверхности объекта, характеризующиеся коэффициентом поглощения A_s поверхности по отношению к падающему солнечному излучению и степенью черноты ε , принимались такими же, как характеристики широко применяемой ариmidной желтой ткани, у которой $A_s = 0,29$, а $\varepsilon = 0,55$.

В качестве моделируемых тепловых нагрузок в диссертации рассматривались нагрузки, соответствующие нахождению объекта над поверхностью Земли на высоте 300 км при трех характерных его ориентациях относительно Солнца и поверхности Земли.

Результаты вычислительных экспериментов для трех вариантов внешнего теплового нагружения представлены в диссертации в виде графиков, на которых приведены значения безразмерных погрешностей воспроизведения заданных внешних тепловых нагрузок для ряда характерных совокупностей элементов тепловоспринимающей поверхности объекта. Представленные на графиках безразмерные погрешности определялись отношением абсолютных погрешностей Δq_i к характерной величине, в качестве которой принималась максимальная плотность q_{\max} поглощенного внешнего теплового потока, то

$$\text{есть } \Delta \bar{q}_i = \frac{\Delta q_i}{q_{\max}}.$$

Для всех трех рассматриваемых случаев внешнего теплового нагружения объекта среднеквадратичная погрешность моделирования не превышала 13%.

Результаты вычислительных экспериментов, выполненных на основе разработанного методического подхода и алгоритма, дают основание заключить, что даже при минимальном числе термоэкранов (4 боковых и 2 торцевых) погрешности моделирования с их помощью внешних тепловых нагрузок на поверхности космических аппаратов несложной наружной конфигурации можно считать приемлемыми. Очевидно, что при увеличении числа экранов точность моделирования будет повышаться, следовательно, идея применение термоэкранов для моделирования внешнего теплообмена космических аппаратов заслуживает внимания.

С целью повышения точности моделирования внешних тепловых нагрузок, в термобарокамере схематично изображенной на рисунке 1 между термоэкранами и испытуемым объектом на каркасе условно цилиндрической формы размещены в определенной упорядоченной форме система галогенных ламп накаливания (рисунок 2).

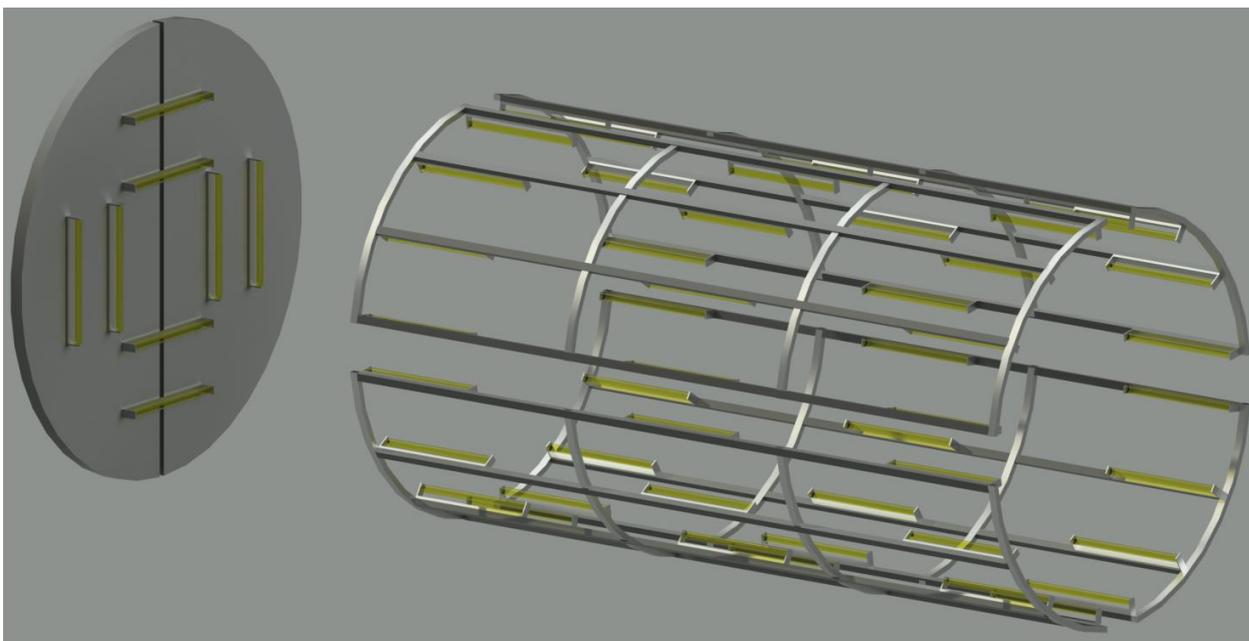


Рисунок 2 - Схема размещения ламповых модулей на цилиндрическом каркасе имитатора и в зоне расположения торцевых термоэкранов

В известной барокамере CLIMATS на боковой поверхности ламповые модули размещаются поясами в трех поперечных сечениях имитатора. В каждом сечении установлено по 16 равномерно отстоящих друг от друга ламп. Одно сечение является центральным, а два других расположены вблизи торцевых термоэкранов. Также в непосредственной близости от каждого торцевого термоэкрана установлено по 6 торцевых ламповых модулей.

В диссертации разработана методика моделирования внешних тепловых нагрузок на космический аппарат в термобарокамерах, оснащённых термоэкранами и системой галогенных ламп накаливания. Эта методика позволяет определять энергетические режимы совместной работы термоэкранов и системы ламп, что дает возможность значительно повысить точность воспроизведения расчетных тепловых нагрузок.

В качестве критерия оптимальности режима работы такого имитатора выбран, как и в других задачах подобного типа, минимум функции ψ , представляющей собой среднеквадратичную погрешность воспроизведения в имитаторе заданных локальных внешних тепловых потоков q_{ii}^0 ($i = 1, 2, \dots, N$) на

элементы внешней поверхности испытуемого объекта, где N - число его тепловоспринимающих элементов.

Для данной задачи целевую функцию можно записать в виде:

$$\psi(J_1, J_2, \dots, J_k) = \sum_{i=1}^N \left(\sum_{j=1}^n \pi \cdot A_{ij} \cdot \phi_{di-j} \cdot J_j + \sum_{m=1}^6 \pi \cdot A_{ij} \cdot \phi_{di-m} \cdot J_m - q_i^0 \right)^2, \quad (3)$$

где ϕ_{di-j} - локальный угловой коэффициент i -го тепловоспринимающего элемента испытуемого объекта и j -лампового модуля; ϕ_{di-m} - локальный угловой коэффициент i -го тепловоспринимающего элемента и термоэкрана под номером m . Для определения оптимального значения вектора $J = (J_1, J_2, \dots, J_k)$ в диссертации решена задача минимизации функции ψ как функции k переменных J_j , $j = 1, 2, \dots, k$ при следующих ограничениях на искомые величины J_j :

$$J_j(0) \geq 0 ; J_j(0) \leq J_{MAX}, \quad (4)$$

где $J_{MAX}(0)$ максимально допустимая интенсивность излучения, зависящая от типа излучателя.

Используя необходимое условие существования экстремума функции многих переменных ($\frac{\partial \psi}{\partial J_k} = 0, k = 1, 2, \dots, n + 6$), получим систему линейных уравнений относительно неизвестных J_j при отмеченных выше ограничениях.

$$\sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^N a_{ij} \cdot a_{im} \cdot J_j = \sum_{i=1}^N a_{ik} \cdot q_i \quad (k = 1, 2, \dots, n + 6), \quad (5)$$

где $a_{ij} = \pi \cdot \phi_{di-j} \cdot A_{ij}$.

Принимая во внимание условие (4), ограничивающее область значений J_j , для решения системы (5) использовался итерационный метод.

В выражение для целевой функции, а также в выражения для коэффициентов линейной системы (5) входят угловые коэффициенты двух

типов, между тепловоспринимающими элементами и колбами ламп, а также угловые коэффициенты между тепловоспринимающими элементами и термоэкранами.

Методики расчета этих угловых коэффициентов с необходимым обоснованием изложены в соответствующих разделах 2-й главы диссертации.

Большое внимание в диссертации уделяется сопоставлению погрешностей моделирования тепловых нагрузок для трех способов их реализации: 1) с использованием термоэкранов; 2) с использованием ламповых модулей; 3) совместное использование термоэкранов и ламповых модулей.

Предполагалось, что испытуемый объект, одинаков для всех рассматриваемых случаев и располагается симметрично относительно цилиндрической поверхности, частями которой являются поверхности боковых экранов.

В качестве моделируемых тепловых нагрузок рассматривались нагрузки, соответствующие нахождению объекта над поверхностью Земли на высоте 300 км в подсолнечной точке (зенитный угол Солнца равен 0^0). Продольная ось oz объекта параллельна поверхности Земли, а ось ox направлена к центру Земли. При этом ось oy направлена на Солнце. Сферическое альbedo Земли (a_{cf}) принималось равным 0,35, а величина солнечной постоянной $S = 1400 \frac{вт}{м^2}$.

Результаты расчетов локальных безразмерных относительных погрешностей $\Delta \bar{q}_i$ для трех сопоставляемых способов моделирования тепловых нагрузок в диссертации представлены в виде графиков.

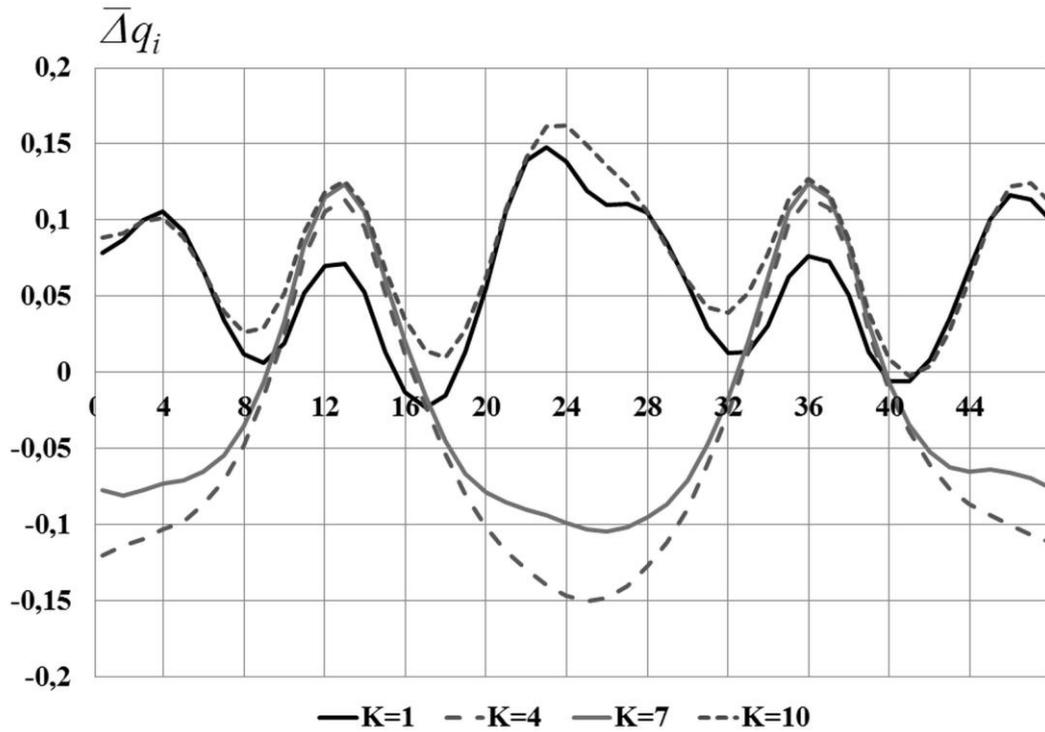
На этих графиках погрешности приводятся не для всех тепловоспринимающих элементов (количество их чрезвычайно велико), а для нескольких совокупностей элементов испытуемого объекта, сгруппированных следующим способом: элементы боковой (цилиндрической) поверхности сгруппированы по поясам (К), которые образованы соседними поперечными сечениями, а группы элементов торцевых поверхностей образованы соседними

окружностями (М), с помощью которых торцевая поверхность (диск) делится на отдельные элементы.

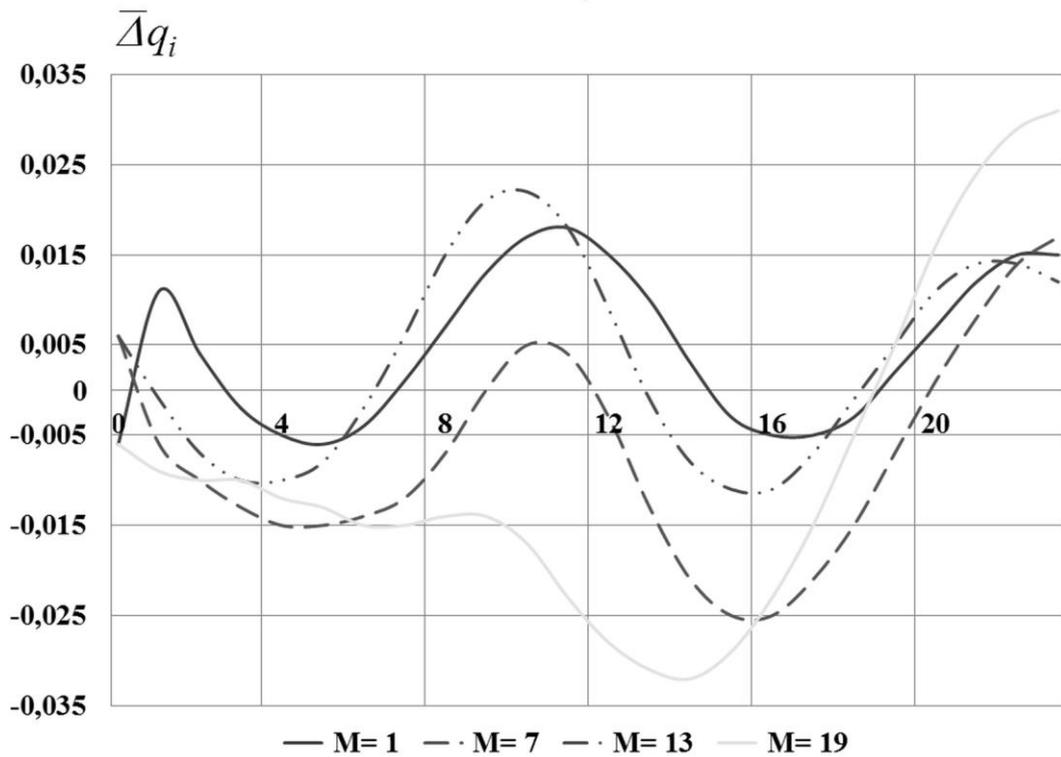
В термобарокамере с термозэкранами в качестве имитаторов внешних тепловых потоков среднеквадратичная погрешность воспроизведения внешней тепловой нагрузки ($\Delta\bar{q}_{КВД}$) составляет величину порядка 0,13; в термобарокамере с использованием ламповых модулей (галогенными лампами накаливания) $\Delta\bar{q}_{КВД} \approx 0,12$; а при совместном использовании термозэкранов и ламповых модулей $\Delta\bar{q}_{КВД} < 0,03$.

В автореферате на графиках рисунка 3 представлены лишь результаты расчета локальных безразмерных погрешностей моделирования внешних тепловых нагрузок в точках поверхности цилиндрического объекта в термобарокамере, оснащенной термозэкранами и системой галогенных ламп накаливания.

Точки расположены в определенных поясах сечений поверхности, а – боковая поверхность, б – торцевая поверхность.



a)



б)

Рисунок 3 - Безразмерные погрешности моделирования расчетных тепловых нагрузок в точках поверхности цилиндрического объекта в термобарокамере, оснащенной термоэкранами и системой галогенных ламп накаливания. Точки расположены в определенных поясах сечений поверхности, а – боковая поверхность, б – торцевая поверхность

На всех графиках по оси абсцисс приводятся номера элементов (граней) в поясе (от 0 до 48).

Таким образом, разработанная методика моделирования внешних тепловых нагрузок на космический аппарат в термобарокамерах, оснащённых термоэкранами и системой галогенных ламп накаливания, позволяет определять энергетические режимы совместной работы термоэкранов и системы ламп, обеспечивающие удовлетворительную точность воспроизведения расчетных тепловых нагрузок на объекты несложной наружной конфигурации внешней поверхности.

В третьей главе излагается разработанная с участием автора диссертации усовершенствованная методика оценки влияния погрешностей моделирования внешних тепловых нагрузок на тепловое состояние космического аппарата. Существующая методика, созданная в прошлом при создании новых тепловакуумных установок, и позволяющая по допустимым погрешностям характерных параметров, определяющим внутреннее тепловое состояние испытуемого объекта, выявлять допустимые погрешности моделирования основных факторов космической среды, в настоящее время является практически невостребованной.

В настоящее время ситуация значительно изменилась. Новые установки создаются значительно реже, чем раньше, а методы и средства имитации, достигнув в своем развитии определенного уровня, который часто можно считать вполне приемлемым, а подчас и не вполне удовлетворительным, изменяются несущественно. Это обстоятельство на первый план выдвигает задачу оценки влияния погрешностей экспериментального моделирования тепловых факторов космического полета на тепловое состояние испытуемого объекта. То есть в настоящее время актуальнее является не решаемая ранее обратная задача, когда по допустимым погрешностям воспроизведения в эксперименте теплового состояния КА оценивались допустимые погрешности моделирования внешних тепловых условий функционирования аппарата, а прямая задача, заключающаяся в оценке возможных погрешностей параметров,

характеризующих тепловое состояние испытуемого объекта, при заданных (имеющих место в используемых экспериментальных установках) погрешностях воспроизведения тех или иных факторов космического полета.

В новой методике проводятся зависимости погрешностей воспроизведения теплового состояния различных характерных элементов КА от погрешностей моделирования внешнего теплового воздействия.

Особое внимание в главе уделяется методике определения реакции плотности результирующего теплового потока через пакет реальной экранно-вакуумной теплоизоляции (ЭВТИ) на возмущение внешнего теплового потока. В известных работах обычно рассматривается реакция на возмущения внешнего теплового воздействия результирующего теплового потока или через идеальную экранно-вакуумную теплоизоляцию, или через элемент оболочки, термическое сопротивление которого не зависит от температуры.

Задача решалась при следующих предположениях:

1) Пакет ЭВТИ отвакуумировался настолько, что теплопереносом за счет теплопроводности остаточного газа и газа, являющегося результатом гажения экранов и прокладочного материала, можно пренебречь.

2) Кондуктивная проводимость пакета через места контактов между экранами изменяется в зависимости от температуры экранов по линейному закону.

3) Теплоперенос через пакет осуществляется по двум параллельным каналам: лучистому и кондуктивному.

Решение задачи подробно описано в разделе 3.2.3 диссертации. Процедура ее решения весьма трудоемка и громоздка, поэтому в автореферате приводится лишь аналитический результат решения без графической его иллюстрации.

Получена линейная зависимость Δq_0^* безразмерной погрешности величины результирующего теплового потока через пакет ЭВТИ

$\bar{\Delta q}_0^* = \frac{\Delta \bar{q}_0(\bar{q}_w)}{\bar{q}_0(\bar{q}_w = 0)}$ от безразмерной погрешности внешнего теплового потока

$$\Delta \bar{q}_w = \frac{\Delta q_w}{\varepsilon_w \cdot \sigma \cdot T_0^4}, \quad \bar{q}^* = K \Delta \bar{q}_w \quad \text{где} \quad K = \frac{1}{f} + \frac{\bar{c}}{2\sqrt{\bar{q}_w - \bar{q}_0}} \cdot \frac{1}{\bar{q}_0(\bar{q}_w = 0)},$$

$$p = \frac{q_\lambda(q_w = 0)}{q_\varepsilon(q_w = 0)}, \quad f = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_{\text{ПРИВ}}}(n-1) + 1, \quad \varepsilon_{np} = \frac{1}{2/\varepsilon - 1},$$

$$\bar{c} = -\frac{p}{f \cdot (\sqrt{1 + p/f} - 1)}.$$

Усовершенствованная и представленная в главе 3 методика оценки влияния погрешностей моделирования внешних тепловых нагрузок на тепловое состояние характерных элементов космических аппаратов расширяет возможности оценки достоверности результатов экспериментальных исследований космической техники в условиях моделирования их внешнего теплообмена в тепловакуумных установках.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработано методическое обеспечение проведения тепловых испытаний космических аппаратов в термобарокамерах, оснащенных термоэкранами (термочехлами) и системой галогенных ламп накаливания для моделирования тепловых нагрузок на поверхность испытуемых объектов с максимально возможной для используемой моделирующей системы точностью.

На основании этого можно сделать следующие выводы:

1. Проанализированы способы моделирования в экспериментальной установке нестационарных во времени и в пространстве лучистых полей, формируемых одновременно и Солнцем и планетой. Показано, что наиболее предпочтительными способами, моделирования внешних нагрузок являются способы, основанные на использовании инфракрасных источников излучения.

2. Разработаны методический подход и алгоритм решения задачи определения температурных режимов термоэкранов, при реализации которых достигается удовлетворительная точность моделирования внешних тепловых нагрузок в термобарокамерах, не оснащенных специальными имитаторами внешних тепловых нагрузок.

3. Разработана новая методика расчета тепловых нагрузок на поверхность космического аппарата в тепловакуумных установках с трубчатými лампами накаливания, отличающаяся от известных методик простотой ввода исходной информации о геометрической модели лампы и многократном (в несколько десятков раз) сокращении времени реализации алгоритма решения задачи.

4. Разработана методика совместного использования термоэкранов и галогенных ламп накаливания в термобарокамерах. Методика позволяет обеспечивать высокую точность моделирования внешних тепловых нагрузок на космические аппараты с несложной формой наружной поверхности.

5. Усовершенствована методика оценки влияния погрешностей моделирования внешних тепловых нагрузок на тепловое состояние

характерных элементов космических аппаратов, в первую очередь на реальную экранно-вакуумную теплоизоляцию и радиационные теплообменники, повышает точность оценки достоверности результатов экспериментальных исследований космической техники при моделировании их внешнего теплообмена в тепловакуумных установках, оснащённых как криогенными экранами, так и термочехлами. При этом для экранно-вакуумной теплоизоляции точность оценок влияния погрешности моделирования внешнего теплового потока на теплоперенос через изоляцию повышается многократно.

6. Выполненное исследование показывает, что точность моделирования внешних тепловых нагрузок в термобарокамерах, оснащенных термоэкранами и системой галогенных ламп накаливания, соизмерима с точностью моделирования в установках, оснащенных криогенными экранами и инфракрасными имитаторами модульного типа, при значительном уменьшении стоимости проведение тепловакуумных испытаний.

Перспективы дальнейшего исследования по теме данной диссертационной работы видятся в более углубленном изучении взаимного теплового влияния термоэкранов и системы галогенных ламп накаливания на формирование температурного поля термоэкранов и поля лучистого потока в рабочем объеме экспериментальной установки.

Список опубликованных работ по теме диссертации

1. Сыздыков Ш. О., Колесников А.В., Палешкин А.В. Оптимизация температурных режимов экранов при моделировании тепловых нагрузок в термобарокамере. // Тепловые процессы в технике. 2016. Т. №9. с.401 – 407.
2. Сыздыков Ш. О., Колесников А.В., Палешкин А.В. Влияние погрешностей моделирования внешних тепловых потоков на теплоперенос через экранно-вакуумную теплоизоляцию. //Тепловые процессы в технике. 2017. Т. №1. с.34 – 39.
3. Сыздыков Ш. О., Колесников А.В., Палешкин А.В. Методика расчета облученности элементов испытываемых объектов в ламповых имитаторах внешних тепловых нагрузок. // Тепловые процессы в технике. 2017. Т. 9. №6. с.267 – 275.
4. Сыздыков Ш. О., Колесников А.В., Палешкин А.В. Перспективы применения галогенных ламп накаливания для моделирования условий внешнего теплообмена космических аппаратов. // Тепловые процессы в технике. 2018. Т. 10. №3-4. с.158 – 165.
5. Сыздыков Ш. О., Колесников А.В., Палешкин А.В. Методика моделирования внешних тепловых нагрузок на космический аппарат в термобарокамерах с термоэкранами и системой галогенных ламп накаливания. // Инженерно-физический журнал. 2019. Т. 92. №4.