

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)»

На правах рукописи



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»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Колесников Анатолий Васильевич

Москва 2019 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 АНАЛИЗ ИЗВЕСТНЫХ МЕТОДОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВНЕШНЕГО ТЕПЛООБМЕНА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ	11
1.1 Обсуждение перспектив экспериментального моделирования тепловых режимов космических аппаратов в условиях, максимально приближенных к натурным условиям эксплуатации	11
1.2 Приближенное моделирование внешнего теплообмена космических аппаратов в тепловакуумных установках, оснащенных имитатором Солнца. 14	14
1.2.1 Воспроизведение экстремальных внешних тепловых нагрузок с использованием имитатора Солнца и имитатора поля излучения планеты . 15	15
1.2.2 Воспроизведение внешних тепловых нагрузок с помощью имитатора Солнца и средств моделирования расчетного теплового воздействия планет на поверхность космических аппаратов	16
1.3 Радиационно-оптические схемы средств приближенного моделирования внешних тепловых потоков на поверхность космических аппаратов	16
1.3.1 Инфракрасные имитаторы модульного типа с условно линейчатыми излучателями.....	16
1.3.2 Инфракрасные имитаторы модульного типа с условно точечными излучателями.....	19
1.3.3 Термозкраны	22
1.3.4 Термозкраны в сочетании с системой галогенных ламп накаливания. 23	23
1.3.5 Сетчатые нагреватели	24
1.3.6 Конформные управляемые электронагреватели	25
2 ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ИНФРАКРАСНЫХ ИМИТАТОРОВ	28
2.1 Сравнительный анализ известных методов оптимизации режимов работы имитаторов модульного типа	28
2.1.1 Экстремальный метод оптимизации	29
2.1.2 Градиентные методы оптимизации	32
2.1.3 Результаты сравнения	34
2.2 Методика определения оптимальных температурных режимов термозкранов при моделировании тепловых нагрузок на поверхность космических аппаратов в термобарокамере	37
2.2.1 Методический подход к решению задачи определения оптимальных значений температур совокупности термозкранов.....	37

2.2.2 Алгоритм расчета локальных угловых коэффициентов.....	39
2.2.3 Оценка эффективности применения термоэкранов для моделирования внешних тепловых нагрузок.....	42
2.3 Методика определения режима работы имитационной системы, включающей в себя термоэкраны и совокупность галогенных ламп накаливания.....	51
2.3.1 Основные геометрические и радиационные характеристики имитатора	51
2.3.2 Геометрическая модель испытываемого объекта	53
2.3.3 Методический подход к решению задачи определения оптимальных значений температур совокупности термоэкранов и величин электрических мощностей, подводимых к лампам.....	54
2.3.4 Методика и алгоритм расчета облученности тепловоспринимающих элементов ламповыми модулями.....	56
2.3.5 Исследование корректности разработанного алгоритма определения локальных угловых коэффициентов для ламповых модулей	64
2.4 Оценка эффективности совместного использования термоэкранов и ламповых модулей в качестве имитатора внешних тепловых нагрузок	71
2.4.1 Основные геометрические и радиационные характеристики имитатора	71
2.4.2 Геометрическая модель испытываемого объекта	73
2.4.3 Результаты оценки эффективности совместного использования термоэкранов и ламповых модулей в качестве имитатора внешних тепловых нагрузок	74
2.5 Обсуждение перспектив развития имитационных средств на основе сетчатых излучателей.....	80
3 УСОВЕРШЕНСТВОВАННАЯ МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВНЕШНИХ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК НА ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА.....	85
3.1 Методический подход к решению задачи	86
3.2 Оценка зависимости погрешностей воспроизведения теплового состояния различных характерных элементов космических аппаратов от погрешностей внешнего теплового воздействия	87
3.2.1 Элемент оболочки с термическим сопротивлением, независящим от температуры	87
3.2.2 Элемент оболочки, защищенный идеальной экранно-вакуумной теплоизоляцией.....	89
3.2.3 Элемент оболочки, защищенный реальной экранно-вакуумной теплоизоляцией.....	91

3.2.4 Отсек, защищенный экранно-вакуумной теплоизоляцией	100
3.2.5 Нетеплоизолированный отсек, оснащенный системой терморегулирования.....	102
3.3 Иллюстрация применения методики на примере оценки теплового влияния исходящего от экранов вакуумной камеры потока фонового излучения на радиационные теплообменники и экранно-вакуумную теплоизоляцию	102
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	106
Список сокращений и условных обозначений.....	108
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	109

ВВЕДЕНИЕ

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 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 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, охлаждаемые 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) Анализ и 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 термозкраны 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 термозкранов используется НИИЭМ при подготовке тепловакуумных испытаний КА в термовакуумной камере CLIMATS.

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

Объектом исследований данной работы является 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, 23 рисунка.

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

В первой главе диссертации 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 приближенным к натурным, сопряжено с большими и, во многих случаях, технически непреодолимыми трудностями, обусловленные тем, что необходимо воссоздания в процессе проведения эксперимента переменных по времени и взаимной ориентации полей излучения, источниками которых является Солнце и планеты.

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. Приводится описание радиационно-оптических схем имитаторов, в которых реализуются приближенные методы моделирования теплового воздействия на поверхность КА внешних источников тепловых потоков.

Во второй главе проводится анализ методов определения оптимальных энергетических режимов работы инфракрасных имитаторов. Рассматриваются методы, применяемые для различных типов инфракрасных имитаторов: имитаторов модульного типа; имитаторов, выполненных в виде совокупности термоэкранов и галогенных ламп накаливания. Рассматривается вопрос о перспективах развития имитационных средств на основе сетчатых нагревателей.

В третьей главе диссертации излагается методика оценки влияния погрешностей моделирования внешних тепловых нагрузок на тепловое состояние характерных элементов КА. Эффективность применения методики продемонстрирована на примере оценки теплового влияния на КА потоков фонового излучения от экранов камеры.

В заключении обобщаются результаты выполненного исследования и представлены выводы по работе.

1 АНАЛИЗ ИЗВЕСТНЫХ МЕТОДОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВНЕШНЕГО ТЕПЛООБМЕНА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

1.1 Обсуждение перспектив экспериментального моделирования тепловых режимов космических аппаратов в условиях, максимально приближенных к натурным условиям эксплуатации

Способ исследования теплового состояния КА в условиях, максимально приближенных к натурным условиям эксплуатации, является наиболее предпочтительным с точки зрения достижения цели – всесторонней отработки теплового режима КА. Подготовка такого рода испытаний сводится главным образом к деятельности по трем направлениям: 1) моделирование испытуемого объекта; 2) подготовка имитационных средств, способных с достаточной точностью воспроизводить основные факторы космического пространства, оказывающее прямое влияние на тепловое состояние КА; 3) планирование испытаний, связанное с выявлением наиболее целесообразных режимов испытаний, определением потребной продолжительности испытаний и т.п.

Достаточно точное моделирование объекта испытаний является весьма важной задачей, решение которой в значительной степени определяет правомерность перенесения результатов испытания на “натуру”. При проведении комплексных и автономных испытаний исследуется, как правило, тепловое состояние теплового макета штатного объекта, конструкция которого в основном соответствует штатному изделию, а отдельные элементы его систем и приборного оборудования заменены на тепловые эквиваленты, соответствующим штатным по тепловыделениям, габаритам, внутренней компоновке, радиационным и теплофизическим характеристикам. Основная трудность моделирования объекта испытания связана с тем, что в наземных условиях отсутствует невесомость, имеющая место в космосе, влияние которой

на тепловой режим проявляется через гидродинамику, гидростатику теплоносителей, а также через влияние на процессы конденсации и испарения. Возникают и другие трудности, обусловленные необходимостью воспроизведения в процессе испытаний эффекта изменения радиационных характеристик наружных поверхностей из-за деградации покрытий в результате воздействия на них жесткого электромагнитного излучения Солнца, а также потока заряженных частиц солнечного происхождения. Причиной существенных погрешностей могут быть и провода, по которым передается информация о температуре, давлении и других параметрах испытуемого объекта. Поэтому в отдельных случаях передачу информации с борта испытуемого объекта целесообразно производить с помощью штатной радиотелеметрической системы или специальной малогабаритной радиопередающей аппаратуры, установленной на объекте только на время испытаний.

Решение задач тепловакуумных испытаний КА не вызывало бы особых затруднений, если бы в распоряжении экспериментаторов имелись имитационные средства, позволяющие с высокой точностью воспроизводить все факторы космической среды, оказывающие воздействие на КА. Однако одновременное воспроизведение всех основных характеристик космического пространства - задача практически неразрешимая. Кроме того, как известно, на способ решения всякой сложной проблемы существенное, а иногда и определяющее влияние, оказывают соображения экономического и организационного характера. При решении задач моделирования физических характеристик космической среды экономические факторы имеют важное значение, поскольку между точностью воспроизведения условий космического пространства, стоимостью создания и эксплуатации имитационных средств существует прямая связь и весьма сильная.

Общепринятым является мнение о том, что работы по экспериментальному исследованию факторов космического пространства можно и даже целесообразно расчленять на группы воздействий. Считают в [7],

например, что при исследовании теплового режима КА в целом или его отдельных частей и систем достаточно воспроизводить следующие факторы космического пространства: высокий вакуум, тепловое излучение Солнца и планет, практическое отсутствие теплового излучения по всем направлениям, которые находятся за пределами телесных углов обзора Солнца и планет, а также практически полное поглощение собственного и отраженного излучения КА.

Воздействие факторов, оказывающих косвенное влияние на тепловой режим КА (ультрафиолетовое и рентгеновское излучение Солнца, корпускулярная радиация, микрометеорные потоки), исследуются отдельно в специальных лабораторных установках. Результаты этих исследований учитываются при составлении методики и программы комплексных и автономных испытаний КА посредством выбора режимов испытаний, ориентации испытуемого объекта в экспериментальной установке и режимов работы имитаторов Солнца и планет.

Несмотря на явное упрощение, связанное с разделением внешних факторов космической среды на группы, задача высокоточного моделирования условий внешнего теплообмена КА в наземных экспериментальных установках для широкого класса околопланетных аппаратов, например, околоземных, все еще является исключительно сложной не только в техническом, но и в методическом отношении. Сложности обусловлены тем, что в большинстве случаев возникает необходимость воссоздания в экспериментальной установке нестационарных во времени и в пространстве лучистых полей, формируемых одновременно и Солнцем и планетой (чаще всего Землей). По ряду причин технического характера имитатор солнечного излучения обычно является неподвижным. Следовательно, для воспроизведения возможного изменения ориентации испытуемого объекта относительно потока солнечного излучения необходимо оснащение тепловакуумной установки устройством, позволяющим поворачивать испытуемый объект относительно двух взаимно перпендикулярных осей, расположенных в плоскости, перпендикулярной

вектору \vec{S} . Кроме того, при неподвижном имитаторе Солнца имитируемое поле излучения планеты должно изменять свою ориентацию, что может быть достигнуто либо за счет поворота всего имитатора планеты относительно оси, перпендикулярной вектору \vec{S} , либо за счет использования специального и очень сложного имитатора с модулями, оснащенными приводами. Вращение КА относительно двух взаимно перпендикулярных осей практически осуществимо только для небольших КА. Для больших и тяжелых КА не вызывает трудностей лишь вращение относительно своей вертикальной оси, а вращение относительно двух осей – сложная техническая задача. Но еще более сложной задачей является воспроизведение поля излучения планеты, изменяющего свою пространственную ориентацию в камере.

Таким образом, экспериментальное моделирование тепловых режимов КА в условиях, максимально приближенных к натурным, сопряжено с большими трудностями, несмотря на то, что имитационная техника позволяет воспроизводить каждый из отмеченных факторов с достаточной точностью. Сложности вызваны тем, что необходима техническая организация совместной работы имитационных систем и испытуемого объекта. Поэтому важное значение приобретают приближенные методы моделирования внешнего теплообмена.

1.2 Приближенное моделирование внешнего теплообмена космических аппаратов в тепловакуумных установках, оснащенных имитатором Солнца

Рассмотрим три приближенных метода моделирования внешнего теплообмена в тепловакуумных установках, оснащенных криогенными экранами, имитирующими космический вакуум и идеальные поглощательные свойства космического пространства, а также средствами вспомогательной

откачки паров и газов, не конденсирующихся на поверхностях криогенных экранов.

1.2.1 Воспроизведение экстремальных внешних тепловых нагрузок с использованием имитатора Солнца и имитатора поля излучения планеты

Метод применяется в тепловакуумных установках, оснащенных помимо отмеченных систем вакуумирования и имитаторов радиационных свойств космического пространства, имитатором солнечного излучения и имитатором поля излучения планет. В данном случае может осуществляться проверка теплового режима КА в условиях имитации наиболее неблагоприятных сочетаний внутренних тепловыделений и стационарных внешних тепловых нагрузок. Неблагоприятные сочетания выбираются на основании результатов расчета теплового режима КА при наличии предположения о квазистационарности процессов внутреннего и внешнего теплообмена. Тепловакуумная установка с неподвижными имитаторами излучения Солнца и планеты должна быть оснащена устройством, позволяющим размещать испытываемый объект нужным образом по отношению к оптической оси имитатора Солнца. Получив при таком способе исследования положительную информацию о тепловом состоянии испытываемого объекта, можно быть уверенным в том, что в реальных, менее жестких тепловых условиях эксплуатации, требуемый тепловой режим КА тем более будет обеспечиваться. Однако получение отрицательного результата не может служить убедительным доказательством недостаточной эффективности средств обеспечения теплового режима, так как условия эксперимента заведомо ужесточались.

1.2.2 Воспроизведение внешних тепловых нагрузок с помощью имитатора Солнца и средств моделирования расчетного теплового воздействия планет на поверхность космических аппаратов

Данный способ целесообразно применять в одном из двух случаев: тепловое состояние КА определяется главным образом воздействием солнечного излучения, а влияние планеты является второстепенным фактором; наружная поверхность гладкая и однородная в отношении радиационных характеристик. В этих условиях, используя опорно-поворотное устройство тепловакуумной установки, можно воспроизводить реальные ориентации КА относительно Солнца, что создает условия для достаточно точной имитации тепловых потоков от Солнца. Тепловое воздействие планеты воспроизводится с помощью упрощенных средств, например, совокупности условно линейчатых, точечных диффузных излучателей или излучающих панелей, размещенных вокруг рабочей зоны экспериментальной установки. Причем речь идет о воспроизведении расчетного теплового воздействия планет на элементы наружной поверхности испытываемого объекта, а не о воспроизведении поля теплового излучения планет по основным параметрам - угловому распределению интенсивности и спектральному составу излучения.

1.3 Радиационно-оптические схемы средств приближенного моделирования внешних тепловых потоков на поверхность космических аппаратов

1.3.1 Инфракрасные имитаторы модульного типа с условно линейчатыми излучателями

Имитаторы выполняются в виде совокупности линейчатых модулей, располагающихся чаще всего вдоль образующих поверхности кругового цилиндра и на торцевых панелях ферменной конструкции [10,31-34,53].

В состав модуля входят излучатель, отражатель, а может входить и теплоизоляция.

В качестве излучателей могут применяться токопроводящие и нагреваемые электрическим током ленты, например, стекло графитовые, полые керамические стержни с вмонтированными в них электронагревателями, тонкостенные трубы с наружными проволочными нагревателями, сетчатые нагреватели, трубчатые инфракрасные кварцевые лампы накаливания и т.п.

Что касается отражателей и теплоизоляции, которые могут входить в состав модуля, то они применяются в основном с целью повышения коэффициента полезного использования подводимой к имитатору энергии и, следовательно, уменьшения нагрузки на криогенную систему установки.

Геометрическая форма отражателей в основном определяется типом излучателя, технологическими и производственными возможностями реализации, а также некоторыми соображениями методического характера, в первую очередь, стремлением не ухудшать качество моделирования радиационных свойств космического пространства. Поверхность отражателя чаще всего является цилиндрической с различной формой направляющей линии. К отражателям не предъявляются особые требования по формированию индикатрис излучения, отличающихся от диффузных. С экономической точки зрения предпочтительны отражатели, обеспечивающие испускание модулями энергии излучения только в направлении рабочей зоны установки. Если рассматривать вопрос об использовании отражателей не только в экономическом аспекте, но и с учетом влияния их на точность моделирования идеальных поглощательных свойств космического пространства, то определенного вывода при комплексном рассмотрении вопроса получить не удастся, потому что при таком анализе немаловажное значение приобретают такие факторы как особенности испытуемого объекта (геометрические, радиационные характеристики наружных поверхностей, характеристики системы обеспечения теплового режима, условия эксплуатации, требования к тепловому режиму, циклограммам внутренних тепловыделений),

продолжительность испытаний, вид снабжения тепловакуумной установки криогенным хладоносителем и т.д. Однако практика эксплуатации имитаторов рассматриваемого класса с модулями, в состав которых входят отражатели с площадью выходного сечения, в несколько раз превышающей площадь поверхности излучателя, свидетельствует о появлении в установке в ряде случаев потоков фонового излучения с недопустимо большой плотностью. В этих случаях использование отражателей представляется нецелесообразным, а для уменьшения потерь энергии можно использовать экранно-вакуумную теплоизоляцию на основе никелевой фольги, экранирующую излучатель с тыльной стороны, то есть со стороны криогенных экранов.

Для имитаторов с ленточными излучателями на основе графитовых материалов разработано эффективное методическое обеспечение их эксплуатации. Такие имитаторы широко применяют в крупных тепловакуумных установках, несмотря на существенный их недостаток, заключающийся в том, что излучающие ленты при нагреве из-за испарения с их поверхности углерода могут становиться причиной загрязнения зеркальных и оптических элементов оборудования экспериментальной установки и элементов испытуемого объекта. В связи с этим пристального внимания заслуживают инфракрасные трубчатые кварцевые лампы накаливания как источники излучения, удобные в эксплуатации и сравнительно легко komponующиеся в конструкции имитатора [5-7]. Однако использование этих ламп затруднено из-за недостаточной изученности вопросов, связанных с методикой определения энергетического режима работы ламп, входящих в состав имитатора. Хотя лампы можно рассматривать как условно линейчатые излучатели и для выбора режима их работы можно использовать отдельные фрагменты известных методических подходов [3,4], разработанных для имитаторов с ленточными и серыми по радиационным свойствам излучателями, но в данном случае имеет место существенные и неблагоприятные различия в решении задачи расчета плотности поглощаемого элементами испытуемого объекта потока излучения. Различия обусловлены в основном двумя

обстоятельствами. Во-первых, в ламповом имитаторе геометрическая форма излучателя и индикатриса его излучения другие, чем в имитаторе с плоскими ленточными излучателями. Во-вторых, спектр исходящего от лампы излучения может существенно отличаться от спектра излучения серого тела, поскольку излучение лампы состоит из таких компонент как прошедшее через колбу излучение спирали, излучение заполняющего колбу газа и излучение самой кварцевой колбы.

Если к лампе подводится небольшая мощность, при которой температура спирали не превышает, допустим, 800K , то в этом случае практически вся энергия излучения лампы исходит от колбы, спектр излучения которой можно принять идентичным спектру излучения серого тела.

В связи с отмеченными обстоятельствами актуальной является задача расчета плотности поглощаемого элементами испытываемого объекта потока исходящего от ламповых модулей имитатора потока излучения. Эта задача подразделяется на две ее составляющие: задачу расчета облученности элементов исследуемого объекта в ламповом имитаторе и задачу расчета плотности поглощаемого потока излучения по известному падающему потоку.

В данной работе во 2-ой главе рассматривается первая составляющая общей задачи с привязкой результатов ее решения к задаче выбора оптимального режима работы лампового имитатора.

1.3.2 Инфракрасные имитаторы модульного типа с условно точечными излучателями

Применяемые в крупных тепловакуумных установках инфракрасные имитаторы имеют, как правило, условно линейчатые излучатели. Но такой тип излучателей сужает область эффективного применения инфракрасных имитаторов, в то время как имитаторы с условно точечными излучателями имели бы перед ними преимущество, когда испытываемый объект имеет сложную форму наружной поверхности. Поэтому актуальной является задача создания

имитатора с условно точечными излучателями, в котором бы с использованием удобных в эксплуатации источников энергии обеспечивался подвод этой энергии к излучающим элементам модуля, испускающим в сторону испытуемого объекта излучение в инфракрасной полосе спектра. Представляется перспективной принципиальная схема модуля имитатора описанная в статье [46]. В этой статье излагаются метод формирования потоков излучения с направленной силой, характеризуемой ламбертовской индикатрисой, ограниченной в той или иной степени коническим телесным углом. Принципиальная схема модуля, схематично изображенная на рисунке 1.1, представляет собой излучающую систему, состоящую из диффузно излучающего диска с диаметром d и параболического зеркального отражателя. Образующей линией поверхности зеркала является парабола CB с фокусом F , совпадающим с наиболее удаленной точкой диска и с осью ox , параллельной прямой AB , где A - край зеркала, а B - точка излучателя, диаметрально противоположная точке F .

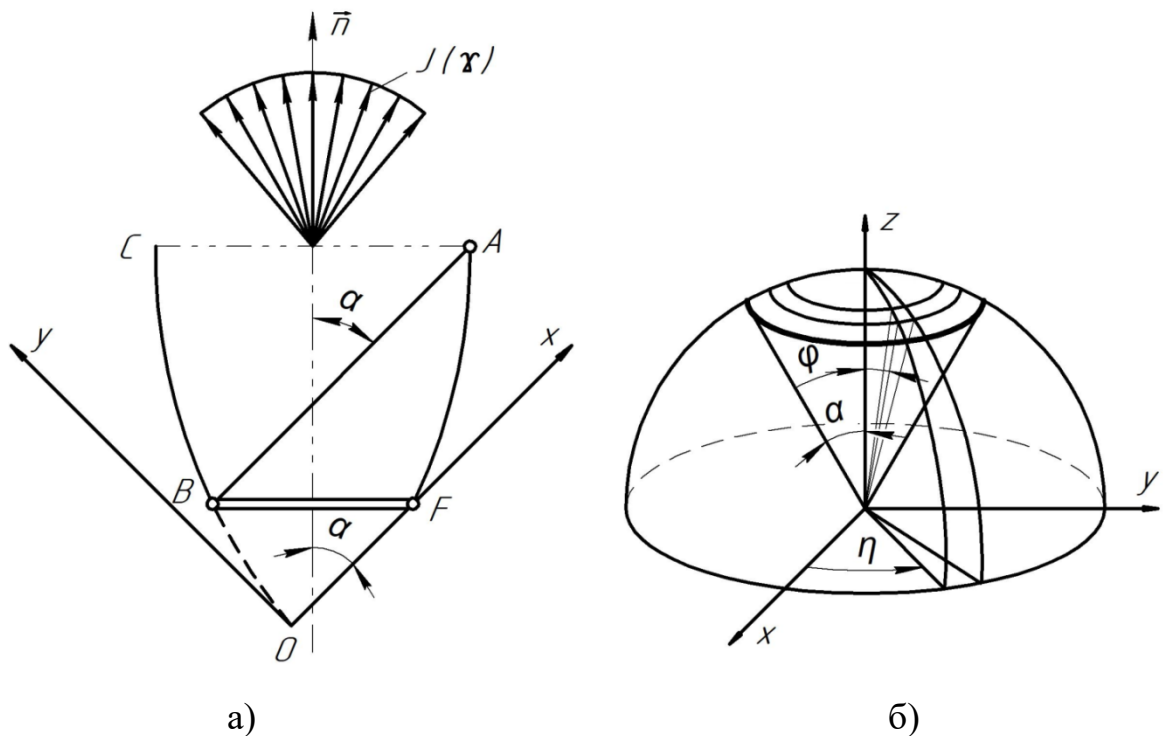


Рисунок 1.1 - Оптическая и расчетная схема системы с диффузным излучателем а) и зеркальным отражателем б), имеющим форму поверхности параболоида вращения

В отмеченной статье показано, что данная излучающая система формирует лучистый поток, распространяющийся с одинаковой интенсивностью в пределах конического телесного угла φ с углом полураствора α .

Используя каноническое уравнение параболы и расчетную схему, приведенную на рисунке 1.1 б), можно выразить основные геометрические параметры рассматриваемой системы через d и α :

$$D = d / \sin \alpha, \quad h = \frac{d \cdot (1 + \sin \alpha)}{2 \sin^2 \alpha}, \quad P = d \cdot (1 + \sin \alpha), \quad (1.1)$$

где p - параметр параболы.

На рисунке 1.2 приведены зависимости относительных размеров поперечного сечения системы с диффузным излучателем и зеркальным параболоидным отражателем ($\bar{h} = h/d$; $\bar{D} = D/d$) от предельного угла α выхода излучения из полости модуля.

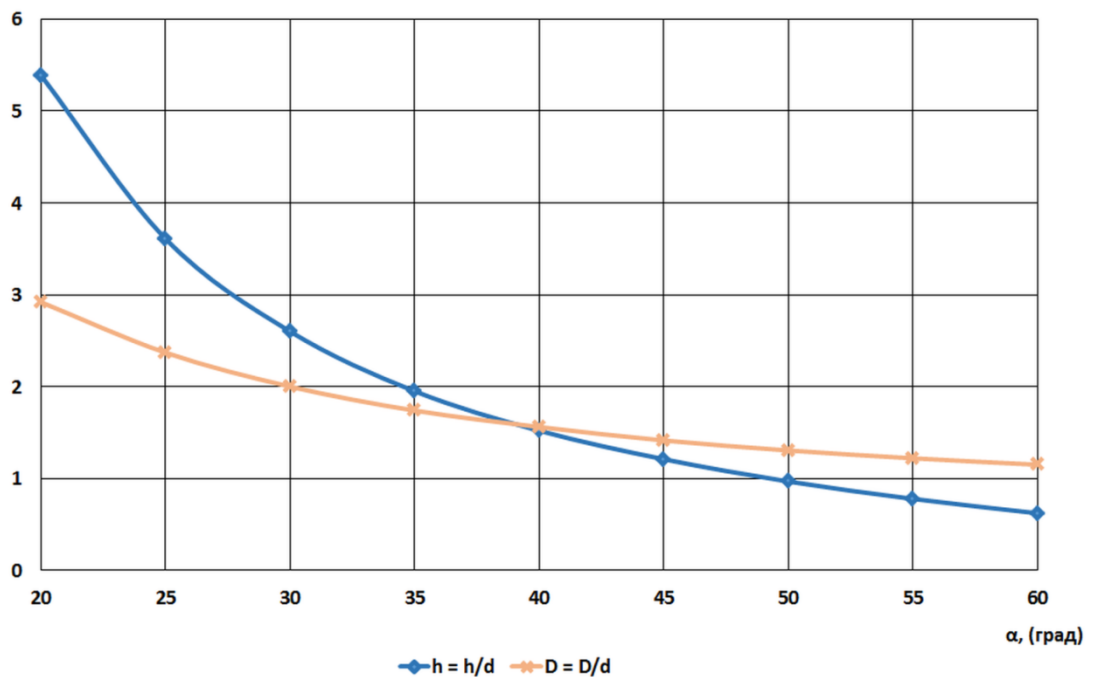


Рисунок 1.2 - Зависимость относительных размеров поперечного сечения системы с диффузным излучателем и зеркальным параболоидным отражателем ($\bar{h} = h/d$; $\bar{D} = D/d$) от предельного угла α выхода излучения из полости модуля,

d - диаметр излучателя, h и D - соответственно высота и диаметр выходного сечения отражателя

1.3.3 Термозкраны

Судя по литературным источникам [71,73,75,78] возрастает интерес к термобарокамерам, оснащенным специальными термозкранами, на поверхности которых может устанавливаться температура в диапазоне от T_{\min} до T_{\max} . Обычно $T_{\min} \in (-180^{\circ}\text{C}; -130^{\circ}\text{C})$, $T_{\max} \approx 150^{\circ}\text{C}$. Установка и поддержание температур экранов на нужном уровне осуществляется с помощью агрегатов термостатирования газообразного азота, в состав которых входят вентилятор, обеспечивающий подачу газообразного азота в теплообменники термозкранов, и электронагреватели. Не выполняя в вакуумной камере функции насосов основной откачки (насосов криоконденсационного типа), эти экраны предназначены в основном либо для термостатирования испытываемого объекта при определенном уровне температур, либо для приближенного моделирования тепловых нагрузок на поверхность испытываемого объекта.

Условная схема такой установки приведена на представленном ниже рисунке 1.3.

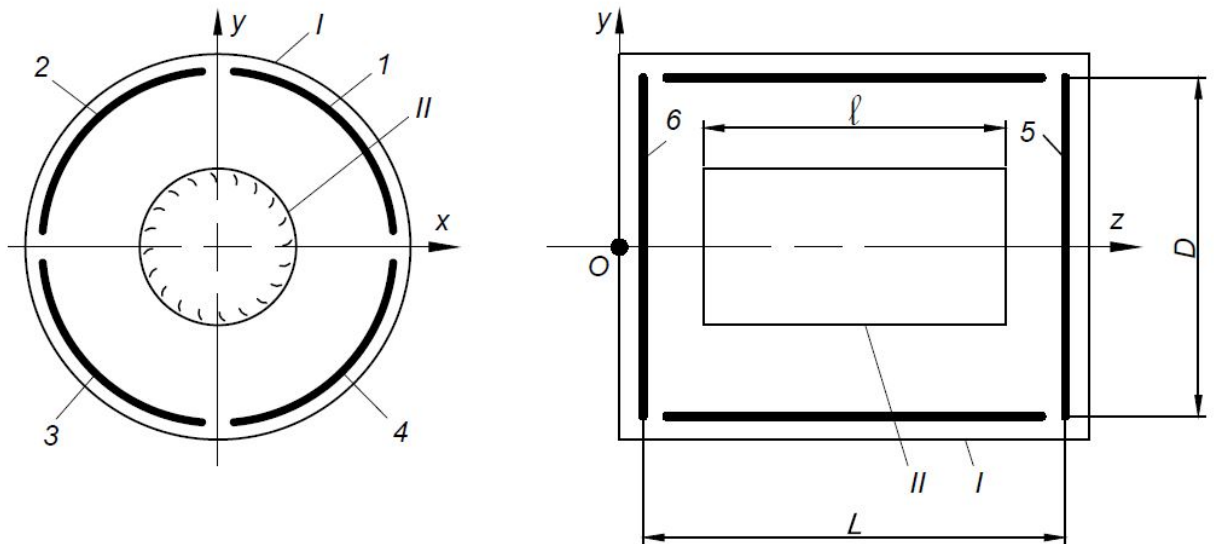


Рисунок 1.3 - Схема размещения испытываемого объекта II в термобарокамере I с четырьмя боковыми (1,2,3,4) и двумя торцевыми (5,6) термозкранами

1.3.4 Термозкраны в сочетании с системой галогенных ламп накаливания

С целью повышения точности моделирования внешних тепловых нагрузок в термобарокамере между термозкранами и испытуемым объектом на некотором каркасе, например, условно цилиндрической формы размещена в какой-то упорядоченной форме система галогенных ламп накаливания. На рисунке 1.4 изображена схема расположения галогенных ламп накаливания, заимствованная из технического описания известной термовакуумной установки CLIMATS [58].

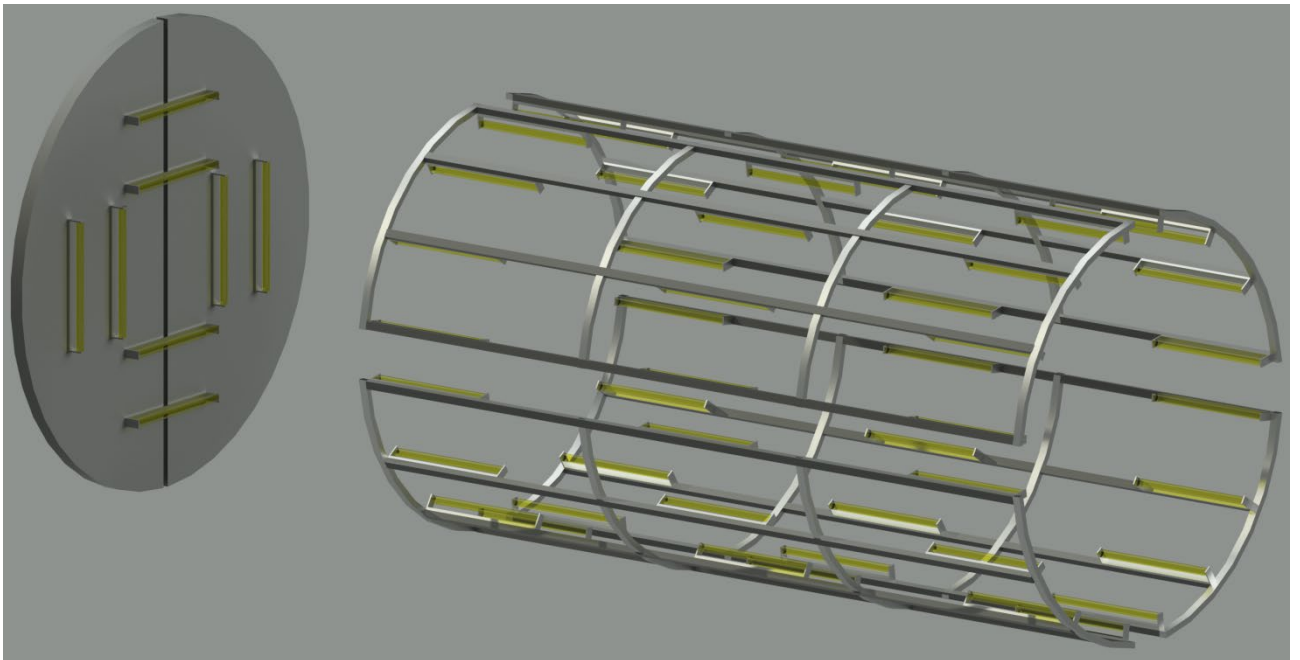


Рисунок 1.4 - Схема размещения ламповых модулей на цилиндрическом каркасе имитатора и в зоне расположения торцевых термозкранов

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 термозкранов. Также в непосредственной близости от каждого торцевого термозкрана установлено по 6 торцевых ламповых модулей.

1.3.5 Сетчатые нагреватели

Излучатели имитаторов выполняются в виде токопроводящих сеток, устанавливаемых в непосредственной близости от тех участков поверхности испытываемого объекта, на которые эти излучатели должны воспроизводить расчетные внешние тепловые нагрузки [53]. Сетки представляют собой совокупность параллельно расположенных и последовательно запитываемых электрическим током проводов из нихрома. Провода натягиваются на рамки, выполненные из неэлектропроводного материала, например, текстолита. При этом диаметр проводов, по крайней мере, в десять раз меньше расстояния между соседними проводами.

Достоинством данного способа моделирования внешнего теплового воздействия является то, что такие излучатели не изменяют теплофизические и радиационные свойства облучаемой поверхности и лишь в незначительной степени экранируют эту поверхность. Но данному способу присущи такие очевидные недостатки, которые сужают область его применения до выполнения всего лишь вспомогательных функций при наличии какого-то другого основного способа моделирования внешнего теплообмена КА. Достаточно отметить хотя бы два из этих недостатков. 1) Если поверхность испытываемого объекта имеет непростую конфигурацию, то весьма сложно, а может и невозможно будет разместить в непосредственной близости от его поверхности совокупность плоских сетчатых элетронагревателей, каждый из которых оказывал бы лучистое тепловое воздействие лишь на определенную ограниченную часть поверхности объекта и не влиял заметным образом на соседние участки поверхности. 2) При близком расположении сетчатого нагревателя от облучаемой поверхности испытываемого объекта шаг между излучающими нитями часто бывает соизмерим с расстоянием до облучаемого объекта, что может привести к появлению недопустимой неоднородности в плотности падающего излучения.

1.3.6 Конформные управляемые электронагреватели

Для воспроизведения расчетных внешних тепловых нагрузок на поверхность испытываемого объекта иногда применяются так называемые конформные управляемые нагреватели [7,65,66,69,70,77], называемые часто поверхностными, пленочными электронагревателями, термоодеялами и даже нагревательными рубашками. При их использовании наружная поверхность испытываемого объекта условно разбивается на какое-то число характерных частей, на каждой из которых внешние тепловые условия можно считать одинаковыми по поверхности. На выделенных участках в зависимости от их конструктивных особенностей применяют следующие способы воспроизведения определенных расчетным путем тепловых потоков: 1) На наружной поверхности секций электронагревателей обеспечиваются такие же значения степени черноты, что и на поверхности соответствующей части КА, на которые эти нагреватели устанавливаются, чаще всего наклеиваются. Электрическая мощность, подводимая к нагревателю, соответствует величине поглощенного этим участком поверхности КА внешнего теплового потока. 2) С помощью поверхностных электронагревателей воспроизводятся расчетные значения наружных температур. 3) Электрические нагреватели устанавливаются под теплоизоляцией на корпусе изделия и с их помощью воспроизводятся расчетные величины теплопритоков к соответствующим элементам корпуса КА. Последний способ применяется только тогда, когда монтаж электронагревателей на наружной поверхности теплоизоляции КА затруднен, а также когда у КА имеется много выносных агрегатов, навесных блоков, связанных в тепловом отношении с корпусом испытываемого объекта.

Рассматриваемые конформные электронагреватели нашли применение в практике тепловой отработки КА благодаря ряду присущих им положительных качеств. Во-первых, с их помощью можно проводить тепловакуумные испытания КА при небольших относительных размерах экспериментальной установки. Во-вторых, электронагреватели представляют собой хорошо

управляемый экономичный источник тепловой энергии, поэтому с их помощью можно воспроизводить тепловое воздействие источников лучистой энергии в космосе даже для КА, совершающих произвольные угловые перемещения относительно последних.

Однако рассматриваемому способу воспроизведения расчетных внешних тепловых потоков присущи очень серьезные недостатки, ограничивающие область его применения. Основные из них заключаются в следующем:

1) Сложна и громоздка система управления подводимой к электронагревателям мощности. Так, например, для тепловых испытаний лунного посадочного модуля КА “Аполлон” потребовалось обеспечение управления 480 секциями электронагревателей [27,65]. 2) Для каждого КА необходимо проектирование и изготовление секций электронагревателей, а затем сравнительно долгая подготовка объекта к испытаниям. 3) С помощью электронагревателей часто не удается воспроизвести с надлежащей точностью расчетные значения внешнего теплового потока к элементам КА, на которых затруднен монтаж нагревателей. 4) Во многих случаях существенно изменяются теплофизические характеристики элементов КА, на которых устанавливаются электронагреватели.

Выводы по главе:

1) Задача высокоточного моделирования условий внешнего теплообмена КА в наземных экспериментальных установках для широкого класса околопланетных аппаратов, например, околоземных, является исключительно сложной не только в техническом, но и в методическом отношении. Сложности обусловлены тем, что в большинстве случаев возникает необходимость воссоздания в экспериментальной установке нестационарных во времени и в пространстве лучистых полей, формируемых одновременно и Солнцем и планетой (чаще всего Землей).

В связи с этим важное значение имеют приближенные методы моделирования внешнего теплообмена КА с помощью инфракрасных источников излучения.

2) Из известных способов приближенного моделирования внешних тепловых нагрузок на поверхность КА, наиболее предпочтительными являются способы, основанные на использовании инфракрасных имитаторов модульного типа с линейчатыми и условно точечными излучателями.

2 ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ИНФРАКРАСНЫХ ИМИТАТОРОВ

2.1 Сравнительный анализ известных методов оптимизации режимов работы имитаторов модульного типа

Практическое использование инфракрасных имитаторов модульного типа сопряжено с необходимостью преодоления больших трудностей, связанных с выбором таких энергетических режимов эксплуатации этих имитаторов, при реализации которых обеспечивалась бы требуемая точность моделирования тепловых нагрузок. Трудности обусловлены тем, что эти имитаторы не воспроизводят параметры поля излучения источников, тепловое воздействие которых на поверхность КА они призваны воспроизводить во время испытаний. С их помощью воспроизводят лишь расчетные значения внешних тепловых нагрузок, источником которых могут быть Солнце, тепловое излучение планет, излучение, исходящее от тех частей КА, которые не вошли в состав испытуемого объекта по причине ограниченности размеров рабочей зоны экспериментальной установки или по другим причинам. Возникает сложная задача управления их энергетическими характеристиками, заключающаяся в определении и реализации таких режимов эксплуатации их излучающих элементов, при которых расчетные внешние тепловые нагрузки воспроизводились бы наилучшим образом, разумеется, в рамках возможностей применяемой имитационной системы.

Кратко рассмотрим два известных метода решения отмеченной задачи [31-34,57] и сопоставим результаты, получающиеся при их реализации. Кроме того, рассмотрим вопрос о единственности полученного решения.

2.1.1 Экстремальный метод оптимизации

Данный метод разработан в МАИ в конце 70-х годов прошлого столетия и успешно применяется в крупных отечественных тепловакуумных установках при подготовке методического и программного обеспечения проведения тепловакуумных испытаний КА или их отдельных фрагментов, а также при проведении комплексных электрических испытаний КА.

В этом методическом подходе энергетический режим работы имитатора характеризуется совокупностью значений интенсивности излучения его элементов (модулей) в направлении своих нормалей, то есть величинами $J_j(0)$ $j = 1...n$, где n - число излучателей. Выбор $J_j(0)$ в качестве оптимизируемых энергетических характеристик модулей обусловлен тем, что эти величины являются выходными функциями модулей и зависят не только от подводимой мощности и конструкции модулей, но и от радиационных характеристик их отражающих поверхностей (если в состав модулей входят отражатели), режима работы вакуумной и криогенной систем установки. Контроль величин $J_j(0)$ является очень сложной технической задачей, поэтому актуальной является задача определения связи между $J_j(0)$ и другими проще контролируемыми параметрами модулей, например, подводимой к модулю электрической мощностью или температурой его излучающих поверхностей.

Для решения рассматриваемой задачи необходимо иметь геометрические модели испытываемого объекта и имитатора, а также информацию о спектральных и интегральных радиационных характеристиках элементов наружной поверхности объекта и излучателей имитатора. В случае, когда принимается во внимание не поглощаемый наружной поверхностью испытываемого объекта поток излучения, а падающий поток, информация о радиационных характеристиках не нужна.

Геометрическая модель имитатора внешних тепловых нагрузок представляется в виде данных о координатах и ориентации его излучателей в системе координат x_{yz} , связанной с имитатором.

Геометрическая модель испытываемого объекта может задаваться одним из двух способов.

Первый заключается в задании координат и ориентации какого-то большого числа элементарных площадок поверхности испытываемого объекта в системе координат x_{yz} , которая введена для задания геометрической модели имитатора. Такой способ является весьма трудоемким.

Второй способ заключается в следующем: Поверхность испытываемого объекта рассматривается как совокупность поверхностей с однородными радиационно-оптическими характеристиками их элементов. На каждой выделенной поверхности в связанной с испытываемым объектом системе координат задаются прямоугольные координаты большого числа точек. Затем осуществляется аппроксимация каждой из однородных поверхностей многогранными поверхностями с треугольными гранями. Определяются ориентации нормалей, координаты центральных точек и площади каждой грани. Центральные точки треугольных граней определяются как точки пересечения их медиан. Затем геометрические характеристики элементов аппроксимирующих многогранных поверхностей преобразуются в систему координат x_{yz} , связанную с экранами. Алгоритм реализации такого подхода описан в работах [5] и реализован в процессе работы над диссертацией в виде компьютерной программы. Заметим, что при введении геометрической модели поверхности испытываемого объекта вторым способом мы в итоге получаем информацию о координатах и ориентации элементарных площадок, расположенных в центральных точках треугольных граней.

Допустим, что число тепловоспринимающих элементов (граней) испытываемого объекта равно N .

Каждому из этих элементов присваивается, в зависимости от требуемой точности воспроизведения внешней тепловой нагрузки, определенный весовой коэффициент b_i ($i = 1, 2, \dots, N$). В качестве критерия оптимальности режима работы имитатора в отмеченных работах выбирается 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. 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. При этом $q_i = \sum_{j=1}^n \pi \cdot A_{di-j} \cdot \Phi(\vec{r}) \cdot \phi_{di-j} \cdot J_j(0)$, 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:

$$\psi(J_1(0), J_2(0), \dots, J_n(0)) = \sum_{i=1}^N b_i^2 \left(\sum_{j=1}^n \pi \cdot A_{ij} \cdot \phi_{di-j} \cdot \Phi(\vec{r}) \cdot J_j(0) - q_i^0 \right)^2. \quad (2.1)$$

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 ограничениях на искомые величины $J_j(0)$:

$$J_j(0) \geq 0, \quad J_j(0) \leq J_{MAX} \quad (2.2)$$

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

Используя необходимое условие существования экстремума функции многих переменных ($\partial\psi/\partial J_k = 0, k = 1, 2, \dots, n$), получим так называемую нормальную систему линейных уравнений относительно неизвестных $J_j(0)$ при отмеченных выше ограничениях.

В связи с необходимостью учета ограничений (2.2) система решается итерационным методом. Такой способ решения задачи определения точки минимума целевой функции порождает следующий вопрос: является ли такой способ наилучшим из всех возможных и является ли выявленная точка минимума функционала единственной.

Следует заметить, что данная задача относится к одному из классов обратных задач - к обратным задачам управления [1,2]. При решении обратных задач другого класса, а именно, задач идентификации и диагностики процессов и явлений широко применяются градиентные методы минимизации целевых функций [1-5]. Такие методы и рассматриваются в следующем разделе главы применительно к решению задачи управления имитатором внешних тепловых нагрузок на поверхность КА.

2.1.2 Градиентные методы оптимизации

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 сопряженных градиентов.

Суть этого подхода заключается в следующем. Пусть $q^0 = (q_1, q_2, \dots, q_N)$ – вектор заданных значений плотности теплового потока в заданных точках поверхности испытуемого объекта. $J(0) = (J_1(0), J_2(0), \dots, J_n(0))$ – вектор управления. Будем выбирать вектор $J(0)$ из условия определенной согласованности вектора q^0 с вектором q значений плотности тепловых потоков, поглощаемых тепловоспринимающими элементами испытуемого

объекта в условиях облучения его модулями рассматриваемого имитатора. При этом

$$q = \left(\sum_{j=1}^n \pi \cdot A_{d1-j} \cdot \varphi_{d1-j} \cdot J_j(0); \sum_{j=1}^n \pi \cdot A_{d2-j} \cdot \varphi_{d2-j} \cdot J_j(0); \dots \sum_{j=1}^n \pi \cdot A_{dN-j} \cdot \varphi_{dN-j} \cdot J_n(0) \right).$$

В приведенном выражении для вектора q предполагалось, что индикатриса излучения модуля имитатора является диффузной, то есть $\Phi(\vec{r}) = 1$.

В качестве меры отклонения вектора q от вектора q^0 выберем среднеквадратичную невязку $\psi(J_1(0), J_2(0), \dots, J_n(0)) = \sum_{i=1}^N \left(\sum_{j=1}^n \pi \cdot A_{di-j} \cdot \varphi_{di-j} \cdot J_j(0) - q_i \right)^2$.

Данная задача в экстремальной постановке сводится к минимизации невязки, то есть функции $\psi(J(0))$. Воспользуемся итерационным алгоритмом оптимизации вектора $J(0)$: $J^{(k+1)}(0) = J^{(k)}(0) + \Delta J^{(k)}(0)$, при этом $J^{(0)}(0)$ – начальное приближение искомого вектора, задаваемое в значительной степени произвольно. В качестве приращения $\Delta J^{(k)}$ при переходе к следующему приближению используется вектор $\Delta J^{(k)} = -\beta^{(k)} \cdot I^{(k)}$, где $I^{(k)}$ – векторная величина, определяющая направление перехода от вектора $J^{(k)}(0)$ к вектору $J^{(k+1)}(0)$ (направление спуска), а $\beta^{(k)}$ – скалярная величина, характеризующая длину шага вдоль этого направления (глубину спуска). Направление спуска можно определять одним из двух известных методов: методом скорейшего спуска или методом сопряженных градиентов.

При использовании метода скорейшего спуска направление спуска определяется вектором, противоположным градиенту функционала $\psi(J(0))$, то есть противоположным вектору $\psi'(J(0)) = \left(\frac{\partial \psi}{\partial J_1(0)}; \frac{\partial \psi}{\partial J_2(0)}; \dots; \frac{\partial \psi}{\partial J_n(0)} \right)$. При этом $\frac{\partial \psi}{\partial J_k(0)} = 2\pi \cdot \sum_{i=1}^N A_{di-k} \cdot \varphi_{di-k} \cdot \left(\sum_{j=1}^n \pi \cdot A_{di-j} \cdot \varphi_{di-j} \cdot J_j(0) - q_i \right)$. Что касается величины $\beta^{(k)}$, то ее целесообразней всего определять численно. А именно: увеличивая $\beta^{(k)}$ от некоторого малого значения с каким-то малым шагом, осуществляем расчет величины целевой функции ψ следя за тем, чтобы при выбранном направлении спуска величина этой функции стала наименьшей. Значение $\beta^{(k)}$,

при котором достигается минимум $\psi(J)$, и является оптимальной глубиной спуска при переходе от вектора $J^{(k)}(0)$ к вектору $J^{(k+1)}(0)$.

Вычислив $k+1$ приближение вектора $J(0)$, переходим к определению следующего приближения. На каждой итерации значение вектора $J(0)$ корректируется в связи с необходимостью выполнения условий по ограничению этого вектора. Итерационный процесс прекращается, как только наметится тенденция к увеличению целевой функции.

Метод сопряженных градиентов отличается от метода скорейшего спуска алгоритмом расчета направления спуска. Если обозначить через S вектор, определяющий направление спуска, то при реализации метода сопряженных градиентов переход от значения этого вектора в предыдущей точке к значению в данной точке осуществляется с использованием соотношения $S^{(k)} = \psi'(J^{(k)}(0)) + \gamma^{(k)} \cdot S^{(k-1)}$, где $\psi'(J^{(k)}(0))$ – градиент невязки в точке k , а $\gamma^{(k)} = -\frac{\psi'(J^{(k)}) \cdot (\psi'(J^{(k-1)}) - \psi'(J^{(k)}))}{(\psi'(J^{(k-1)}))^2}$. Следует отметить, что $S^{(0)}$ принимается равным градиенту целевой функции в точке, соответствующей начальному приближению вектора $J^{(0)}(0)$.

Оптимизация вектора $J(0)$ осуществляется по такому же итерационному алгоритму, что и в случае использования метода скорейшего спуска:

$$J^{(k)}(0) = J^{(k-1)} - \beta^{(k-1)} \cdot S^{(k-1)}$$

2.1.3 Результаты сравнения

Методы градиентного типа, а также оптимизации вектора $J(0)$, основанный на использовании необходимого условия существования экстремума функции многих переменных, в статье [60] были реализованы в виде Фортран-программы, с помощью которой проводились вычислительные эксперименты по определению эффективности этих методов.

При проведении этих экспериментов в качестве имитатора рассматривался имитатор с условно линейчатыми излучателями, расположенными вдоль образующих поверхности кругового цилиндра. По высоте излучатели расположены в виде 6 поясов (рядов). В каждом ряде находятся 24 излучателя, размещаемых равномерно по окружности с угловым шагом 7.5° . Схема размещения излучателей и их параметры являются типичными для инфракрасного имитатора установки ВК 600/300.

Линейные размеры имитатора и испытуемого объекта относились к диаметру D имитатора. Относительная высота H имитатора принималась равной $\frac{3}{2}$. В качестве внешней поверхности испытуемого объекта рассматривалась поверхность кругового цилиндра с относительным диаметром $d/D = 0,5$ и относительной высотой $h/D = 1$. Эта поверхность аппроксимировалась поверхностью многогранника с 912 гранями. Для осуществления аппроксимации на цилиндрической поверхности задавались координаты 480 точек. Точки располагались в 20 поперечных сечениях по 24 точки в каждом сечении. В рассматриваемом случае имитатор должен был воспроизвести ситуацию внешнего теплового нагружения цилиндрической поверхности, подвергающейся воздействию потока солнечного излучения, падающего на нее сбоку (перпендикулярно продольной оси), и воздействию потока собственного излучения Земли. Предполагалось, что объект находится на расстоянии 300 км от поверхности Земли, а его продольная ось перпендикулярна поверхности Земли. Величины плотности тепловых потоков, падающих на элементы рассматриваемой поверхности определялись по известной методике, представленной в работе [57]. Поглощательная способность поверхности объекта по отношению к солнечному излучению (A_s) принималась равной 0,29, а поглощательная способность по отношению к инфракрасному излучению, в том числе и к излучению, исходящему от модулей имитатора, принималась равной 0,55. Такие радиационные характеристики характерны для арамидной ткани, применяемой для облицовки

матов экранно-вакуумной теплоизоляции, использующейся в космической технике.

Абсолютные погрешности Δq воспроизведения расчетных внешних тепловых нагрузок относились к характерной величине $q_{хар}$, в качестве которой была принята величина, равная максимальной локальной расчетной плотности теплового потока, поглощаемого поверхностью рассматриваемого испытуемого объекта. Эта величина принималась равной $460 \frac{вт}{м^2}$. Что касается упомянутого выше ограничения по величине максимально допустимой интенсивности излучения модулей имитатора J_{MAX} , то она принималась равной $16000 \frac{вт}{м^2 \text{стерад}}$, исходя из значения максимально допустимой температуры излучателя $T \leq 970K$.

При сравнении результатов вычислительных экспериментов в статье [64] была обнаружена существенная разница в распределении интенсивности излучения модулей, и следовательно, в распределении электрической мощности, подводимой к модулям имитатора при использовании рассматриваемых подходов.

Однако отличие локальных погрешностей моделирования заданных тепловых потоков для трех рассматриваемых подходов к решению задачи оказалось несущественным. При этом среднеквадратичные погрешности отличались, не более чем на 0,2%. Это свидетельствует о том, что градиентные методы оптимизации и экстремальный метод, основанный на использовании необходимого условия существования экстремума функции многих переменных, дают практически одинаковые результаты по точности моделирования тепловых нагрузок. При этом значения минимумов целевой функции для трех сопоставляемых методов мало отличаются друг от друга, но, точки минимума (значения вектора $J(0)$, при котором функция ψ принимает минимальное значение) отличаются существенно. Это свидетельствует об

отсутствии единственности решения рассматриваемой задачи, то есть о наличии у целевой функции неединственного минимума.

2.2 Методика определения оптимальных температурных режимов термоэкранов при моделировании тепловых нагрузок на поверхность космических аппаратов в термобарокамере

2.2.1 Методический подход к решению задачи определения оптимальных значений температур совокупности термоэкранов

Пусть в термобарокамере вокруг испытуемого объекта размещаются n автономных термоэкранов, которые призваны воспроизводить наилучшим образом заданные тепловые нагрузки на N тепловоспринимающих элементов испытуемого объекта.

В качестве критерия оптимальности, как и в других задачах подобного типа, принимается минимум суммы квадратов “взвешенных” погрешностей воспроизведения заданных тепловых нагрузок. 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.

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

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

q_i^0 - заданная величина плотности теплового потока, подводимого к i -ому тепловоспринимающему элементу ($i = 1, 2, \dots, N$);

ε_j - степень черноты поверхности экрана;

σ - постоянная Стефана-Больцмана;

φ_{di-j} - локальный угловой коэффициент i -го тепловоспринимающего элемента и j -го экрана ($j = 1, 2, \dots, n$);

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 ($i = 1, 2, \dots, N$).

Для нахождения точки минимума целевой функции воспользуемся необходимым условием экстремума функции многих переменных $\frac{\partial \psi}{\partial T_j} = 0$, $j = 1, 2, \dots, n$.

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 , $j = 1, 2, \dots, n$

$$\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^N b_i \cdot A_{di-j} \cdot A_{idi-k} \cdot \varphi_{di-j} \cdot \varphi_{di-k} \cdot q_j = \sum_{i=1}^N b_i^2 \cdot A_{di-k} \cdot \varphi_{di-k} \cdot q_i^0, \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (2.3)$$

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 системы (2.3) 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.

2.2.2 Алгоритм расчета локальных угловых коэффициентов

Составим алгоритм расчета угловых коэффициентов для некоей установки, боковая поверхность которой имеет форму поверхности кругового цилиндра, а торцы имеют форму поверхности шарового сегмента. Допустим, что внутри установки соосно с ней установлены m одинаковых по геометрическим характеристикам боковых термоэкранов, форма поверхности которых представляет собой часть поверхности кругового цилиндра, и два плоских торцевых термоэкранов круглой формы.

Составим геометрические модели таких экранов, введя в рассмотрение прямоугольную систему координат xuz с осью oz , совпадающей с продольной осью термовакuumной установки. Начало координат совместим с центральной точкой одного из торцевых экранов, который условимся называть нижним, а другой - верхним. Пусть длина каждого из боковых экранов равна L и расстояние между торцевыми экранами также примем равным L . Положение каждого из боковых экранов будем характеризовать двумя полярными углами $\beta_1(j)$ и $\beta_2(j)$, отсчитываемыми от оси ox . Предполагая, что соседние экраны располагаются вплотную друг к другу, можно определить величины углов $\beta_1(j)$

$$\text{и } \beta_2(j) \text{ для } j = 1, 2, \dots, m: \beta_1(j) = \frac{2\pi \cdot (j-1)}{m}, \beta_2(j) = \frac{2\pi \cdot j}{m}.$$

Для вычисления локальных угловых коэффициентов необходимо знать координаты центральных точек и ориентацию всех площадок, на которые можно разбить каждый экран, используя какую-либо схему деления. Разделим, например, каждый экран поперечными секущими плоскостями, перпендикулярными оси oz , и осевыми секущими плоскостями, следующими друг за другом с угловым шагом $d\beta$. Если обозначить через R радиус цилиндрической поверхности, частью которой является поверхность экрана, то площадь элементарной площадки dF_j характеризуется выражением $dF_j = R \cdot d\beta \cdot dz$, а координаты x_j, y_j, z_j ее центра равны соответственно $R \cdot \cos \beta_j$, $R \cdot \sin \beta_j$, z , где $z \in [0; l]$, $\beta_j \in [\beta_1(j); \beta_2(j)]$. Ориентация элемента dF_j определяется

направляющими косинусами нормали \vec{n}_j , которые обозначим через m_j, n_j, p_j . В выбранной системе координат $m_j = -\cos \beta_j, n_j = -\sin \beta_j, p_j = 0$.

Разбиение торцевых экранов на мелкие площадки осуществим с помощью системы окружностей с радиусами R_j , изменяющимися от 0 до R с шагом dR , и прямых, проходящих через центр круга под углом γ по отношению к оси ox с угловым шагом $d\gamma$. В этом случае координаты центральных точек площадок dF_j можно представить в виде $x_j = (R_j - dR/2) \cdot \cos(\gamma - d\gamma/2)$; $y_j = (R_j - dR/2) \cdot \sin(\gamma - d\gamma/2)$; $z_j = 0$ - для нижнего экрана и $z_j = l$ - для верхнего экрана. Выражение для площадей площадок деления при принятых обозначениях имеет вид: $dF_j = (R_j^2 - (R_j - dR)^2) \cdot d\gamma/4$. Направляющие косинусы нормалей элементов dF_j равны 0 за исключением p_j . Для нижнего экрана $p_j = 1$, а для верхнего - $p_j = -1$.

Помимо геометрической модели системы экранов для расчета локальных угловых коэффициентов необходимо иметь геометрическую модель испытываемого объекта. Она может задаваться двумя способами.

Первый способ заключается в задании координат и ориентации какого-то большого числа элементарных площадок поверхности испытываемого объекта в системе координат xuz , которая введена для задания геометрической модели системы экранов. Такой способ является весьма трудоемким.

Второй способ заключается в следующем: Поверхность испытываемого объекта рассматривается как совокупность поверхностей с однородными радиационно-оптическими характеристиками их элементов. На каждой выделенной поверхности в связанной с испытываемым объектом системе координат задаются прямоугольные координаты большого числа точек. Затем осуществляется аппроксимация каждой из однородных поверхностей многогранными поверхностями с треугольными гранями. Определяются ориентации нормалей, координаты центральных точек и площади каждой грани. Центральные точки треугольных граней определяются как точки

пересечения их медиан. Затем геометрические характеристики элементов аппроксимирующих многогранных поверхностей преобразуются в систему координат x, y, z , связанную с экранами. Алгоритм реализации такого подхода описан в работе [5] и реализован в виде компьютерной программы. Заметим, что при введении геометрической модели поверхности испытываемого объекта вторым способом мы в итоге получаем информацию о координатах и ориентации элементарных площадок, расположенных в центральных точках треугольных граней.

Для составления алгоритма расчета локальных угловых коэффициентов введем в дополнение к уже имеющимся следующие обозначения, в основном касающиеся геометрических характеристик элементов поверхности испытываемого объекта.

x_i, y_i, z_i - прямоугольные координаты центральных точек элементарных тепловоспринимающих площадок dF_i испытываемого объекта;

m_i, n_i, p_i - направляющие косинусы нормалей элементарных площадок;

$\vec{\rho}_{di-dj} = (x_j - x_i, y_j - y_i, z_j - z_i)$ - трехмерный вектор с началом в точке $M_i(x_i, y_i, z_i)$ и с концом в точке $M_j(x_j, y_j, z_j)$;

α_i - угол между вектором $\vec{n}_{di}(x_i, y_i, z_i)$ и вектором $\vec{\rho}_{di-dj} = -\vec{\rho}_{dj-di}$;

α_j - угол между вектором $\vec{n}_{dj}(x_j, y_j, z_j)$ и вектором $\vec{\rho}_{dj-di}(x_i - x_j, y_i - y_j, z_i - z_j)$;

$d\varphi_{di-dj}$ - элементарный угловой коэффициент элемента dF_i с элементом dF_j

Как известно [7] $d\varphi_{di-dj} = \frac{\cos \alpha_i \cdot \cos \alpha_j}{\pi \cdot |\vec{\rho}_{di-dj}|^2} \cdot dF_j$, где $\cos \alpha_i = (\vec{n}_{di}, \vec{\rho}_{di-dj})$,

$$\cos \alpha_j = (\vec{n}_{dj}, \vec{\rho}_{dj-di})$$

Из смысла локального углового коэффициента следует, что $\varphi_{di-j} = \int_{F_j} d\varphi_{di-dj}$.

2.2.3 Оценка эффективности применения термоэкранов для моделирования внешних тепловых нагрузок

Кратко описанный в предыдущих разделах методический подход и алгоритм 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 поверхность космического аппарата с помощью нескольких термоэкранов. Ниже приводятся результаты этих оценок для случая термовакуумной установки с четырьмя боковыми ($m = 4$) и двумя торцевыми экранами (см. рисунок 1.3).

Пусть длина боковых экранов равна L , а диаметр цилиндрической поверхности, частями которой являются поверхности боковых экранов, равен D . В качестве испытуемого объекта рассматривался гипотетический цилиндрический отсек с диаметром d и длиной l .

Линейные размеры экранов и испытуемого объекта относились к диаметру D .

Пронумеруем экраны, считая, что первый экран располагается в пределах полярных углов $\beta \in [0; \pi/2]$, второй - в пределах $\beta \in [\pi/2; \pi]$, для третьего - $\beta \in [\pi; 3/2\pi]$, для четвертого - $\beta \in [3/2\pi; 2\pi]$. Относительную длину экранов $\bar{L} = L/D$ примем равной 1,5. Относительный диаметр торцевых экранов будем считать равным 1. Относительный диаметр испытуемого объекта $\bar{d} = d/D$ принимался равным 0,5, а относительная длина $\bar{l} = l/D$ предполагалась равной 0,75. В качестве радиационно-оптических характеристик поверхности объекта, характеризующих коэффициентом поглощения A_s поверхности по отношению к падающему солнечному излучению и степенью черноты ε , принимались

характеристики, широко применяемой ариимидной ткани, у которой $A_s = 0,29$, а $\varepsilon = 0,55$.

Допустим, что поверхность испытуемого объекта располагается симметрично относительно цилиндрической поверхности, частями которой являются поверхности боковых экранов. Схема размещения объекта относительно экранов приведена на рисунке 1.3. На этой схеме позиция *I* соответствует стенкам термобарокамеры, а позиция *II* - испытуемому объекту.

В качестве моделируемых тепловых нагрузок рассматривались нагрузки, соответствующие нахождению объекта над поверхностью Земли на высоте 300км при трех проиллюстрированных на рисунке 2.1 характерных его ориентациях относительно Солнца и поверхности Земли.

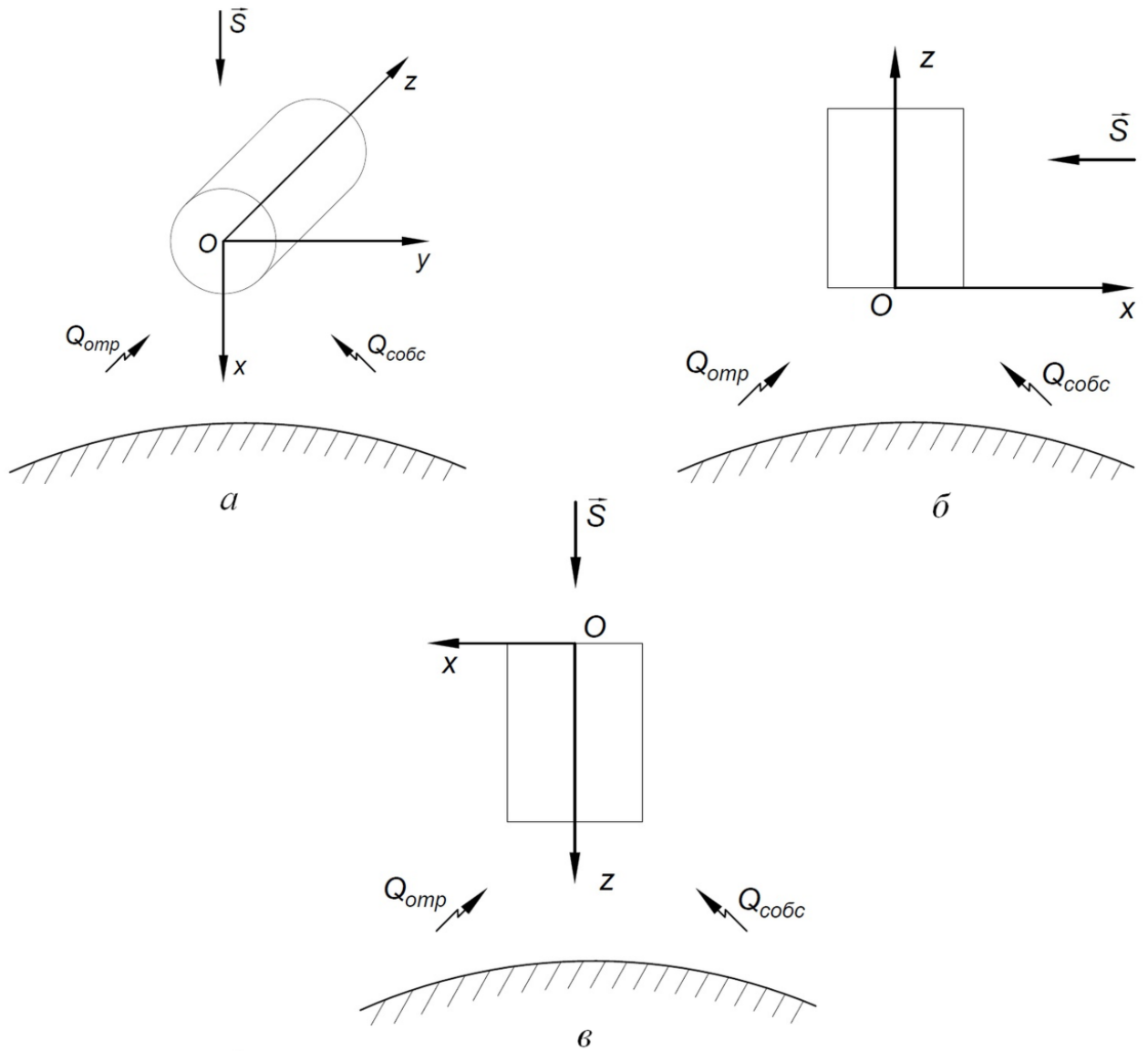


Рисунок 2.1 - Рассматриваемые варианты ориентации цилиндрического объекта относительно источников внешних тепловых потоков

а) Объект находится над поверхностью Земли в подсолнечной точке (зенитный угол Солнца равен 0°). Продольная ось oz объекта параллельна поверхности Земли, а ось ox направлена к центру Земли. При этом ось $-ox$ направлена на Солнце (см. рисунок 2.1а).

б) Объект находится в плоскости терминатора. Его продольная ось перпендикулярна поверхности Земли и направлена в противоположную сторону от центра; вектор \vec{S} потока солнечного излучения перпендикулярен оси oz (см. рисунок 2.1б).

в) Объект находится, как и в первом случае, в подсолнечной точке. Ось oz направлена к центру Земли. Поток прямого солнечного излучения падает только на нижнюю торцевую поверхность (см. рисунок 2.1в).

Для всех трех случаев внешнего теплового нагружения сферическое альbedo Земли ($a_{сф}$) принималось равным 0.35, а величина солнечной постоянной $S = 1400 \text{ вт/м}^2$.

Расчет плотности падающих на элементы испытываемого объекта тепловых потоков от Солнца и Земли осуществлялся по известной методике [2].

Каждый из боковых экранов представлялся в виде совокупности 480 одинаковых по площади элементов. Экран делился на элементы 20 поперечными и 24 осевыми секущими плоскостями.

Разбиение торцевых экранов на мелкие площадки осуществлялось с помощью 20 окружностей с радиусами, изменяющимися от 0 до $D/2$, и 24 прямыми, проходящих через центр круга под углами, изменяющимися от 0 до 360° с угловым шагом 15° .

Боковая поверхность испытываемого объекта аппроксимировалась поверхностью многогранника с 912 треугольными гранями, находящихся в 19 поясах с 48 гранями в каждом поясе. Пояса образованы 20 поперечными сечениями цилиндрической поверхности, следующих друг за другом с одинаковым шагом $\Delta z = l/20$. Аппликата первого сечения равна 0, последнего - l . Каждая из торцевых частей испытываемого объекта представлялась как совокупность 480 мелких площадок. Разбиение торцевых частей объекта осуществлялось точно также, как и разбиение торцевых термоэкранов.

Результаты вычислительных экспериментов для трех охарактеризованных выше вариантов внешнего теплового нагружения представлены ниже в виде таблиц 1 - 3 и графиков на рисунках 2.3 - 2.5.

В таблицах представлены результаты расчета оптимальных значений температур термоэкранов и плотности потока их излучения.

Таблица № 1

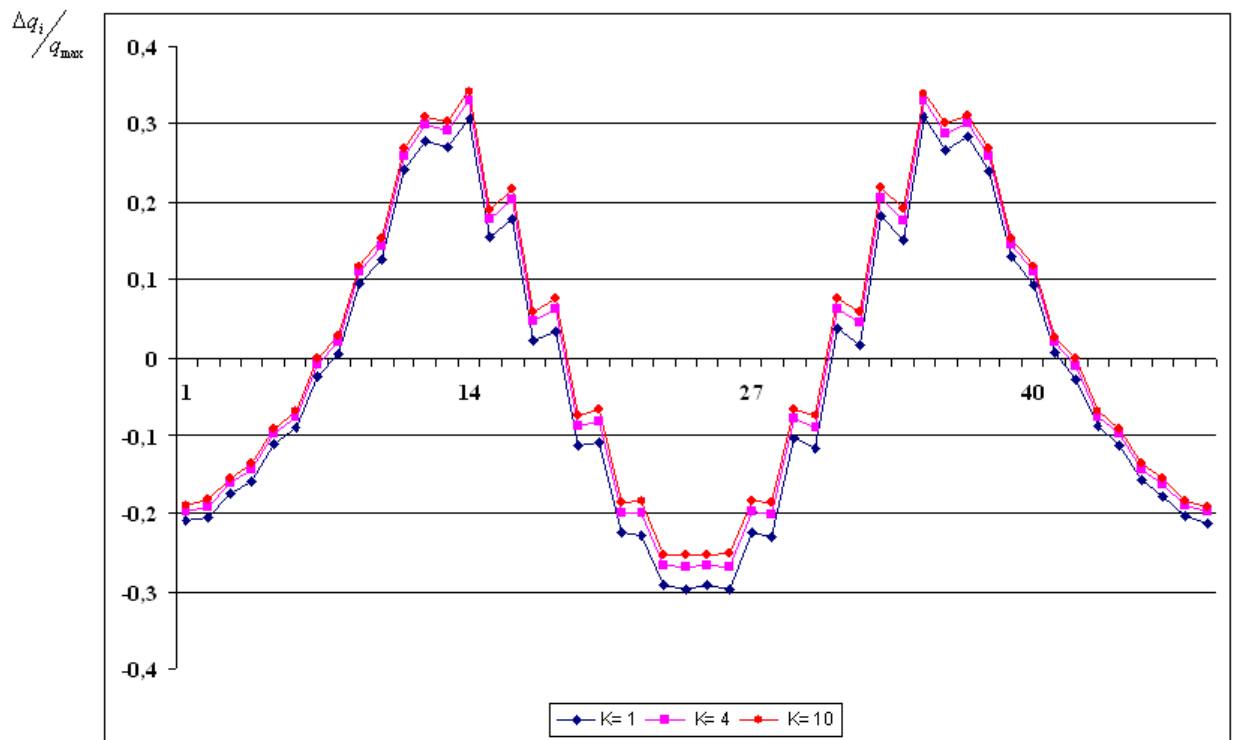
Номер термоэкрана	1	2	3	4	5	6
T, C	3,4	47,3	47,5	3,2	-93,9	-93,9
$q, \frac{Вт}{м^2}$	310,9	560,8	562,6	310,0	54,8	54,8

Таблица № 2

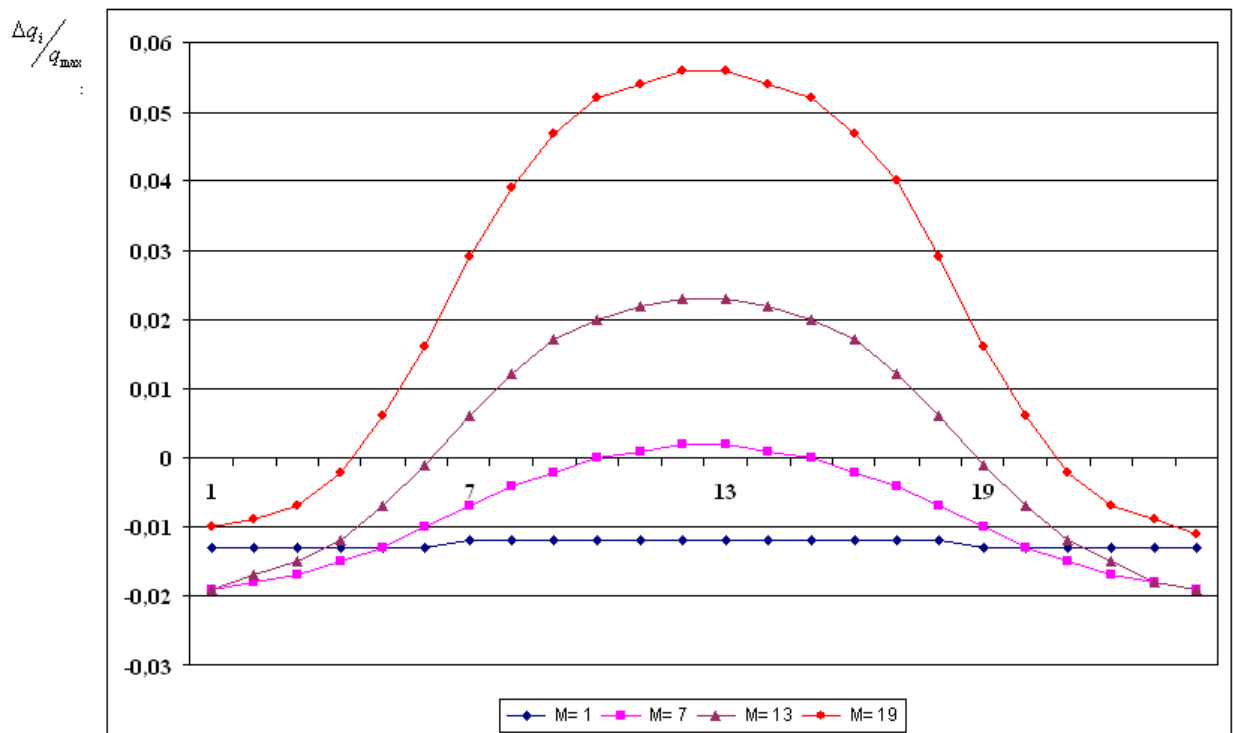
Номер термоэкрана	1	2	3	4	5	6
T, C	54,9	-150	-150	54,6	-35,2	-150
$q, \frac{Вт}{м^2}$	616,1	12,2	12,2	613,8	170,3	12,2

Таблица № 3

Номер термоэкрана	1	2	3	4	5	6
T, C	-47,0	-47,1	-47,1	-46,9	45,5	91,7
$q, \frac{Вт}{м^2}$	139,1	138,8	138,7	139,2	548,5	943,2

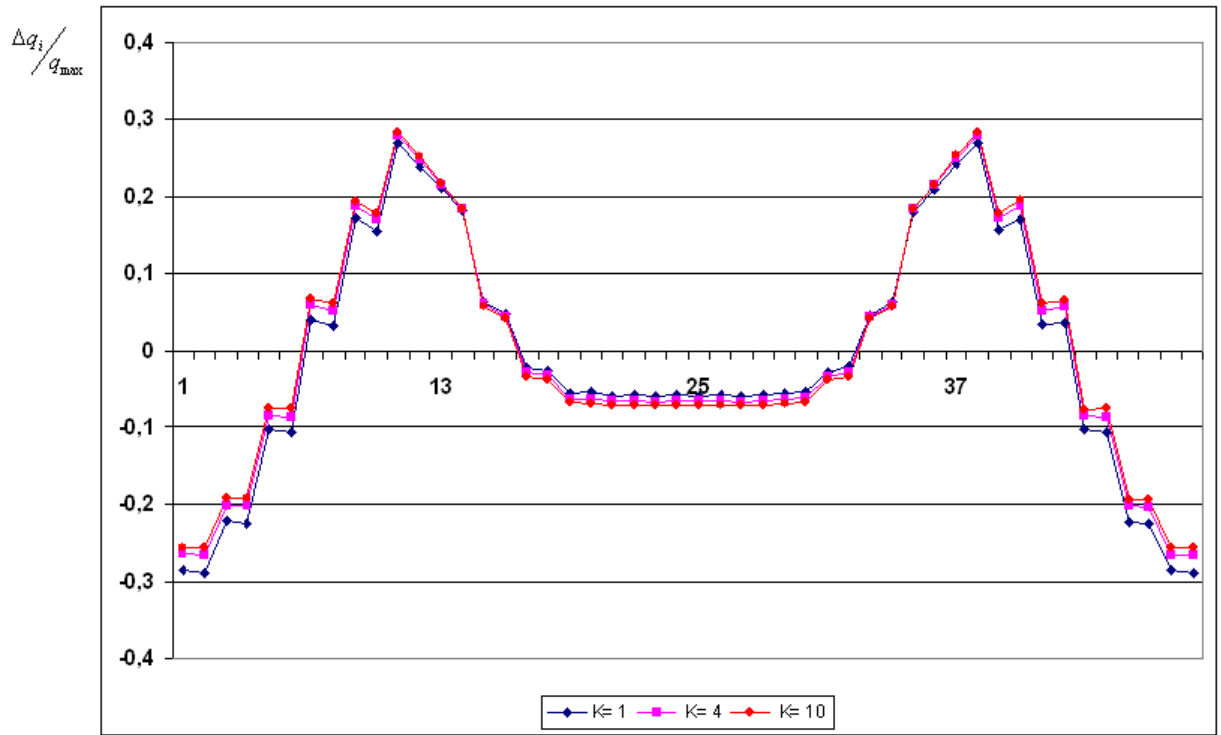


а

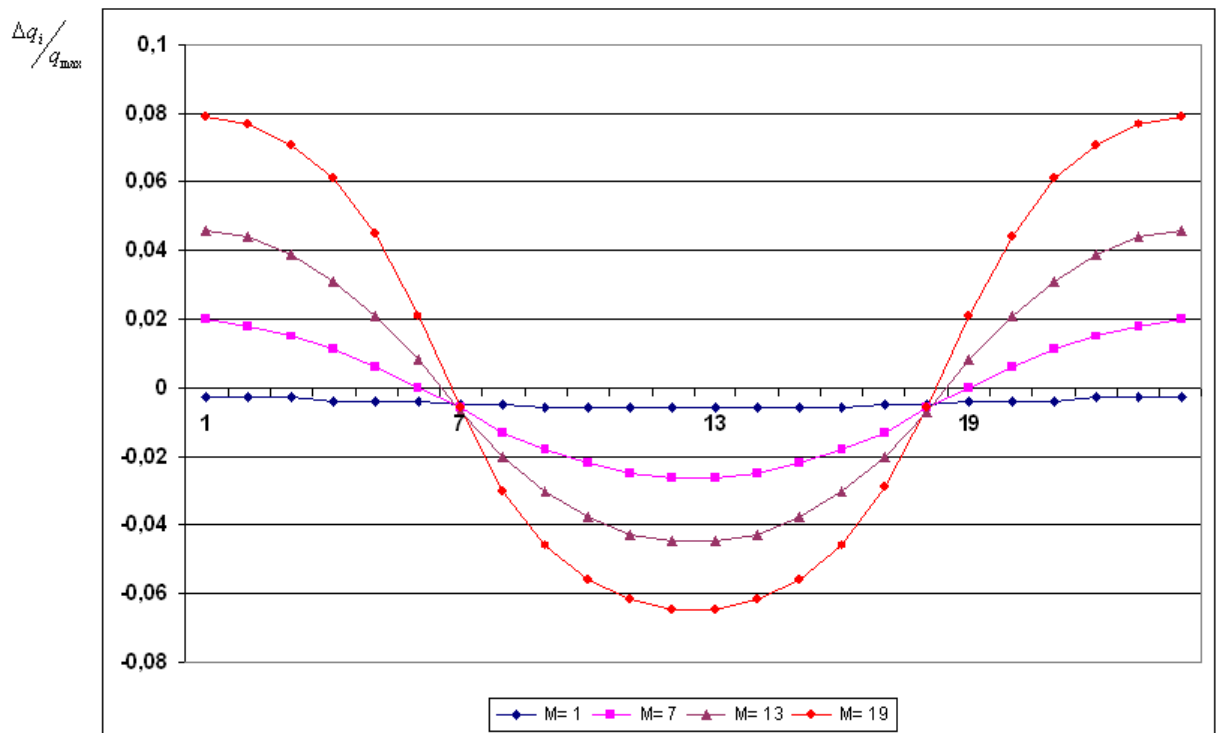


б

Рисунок 2.3 - Безразмерные погрешности моделирования расчетных тепловых нагрузок в точках поверхности цилиндрического объекта для первого варианта теплового нагружения. Точки расположены в определенных сечениях поверхности, а – боковая поверхность, б – торцевая поверхность



а



б

Рисунок 2.4 - Безразмерные погрешности моделирования расчетных тепловых нагрузок в точках поверхности цилиндрического объекта для второго варианта теплового нагружения, а – боковая поверхность, б – торцевая поверхность

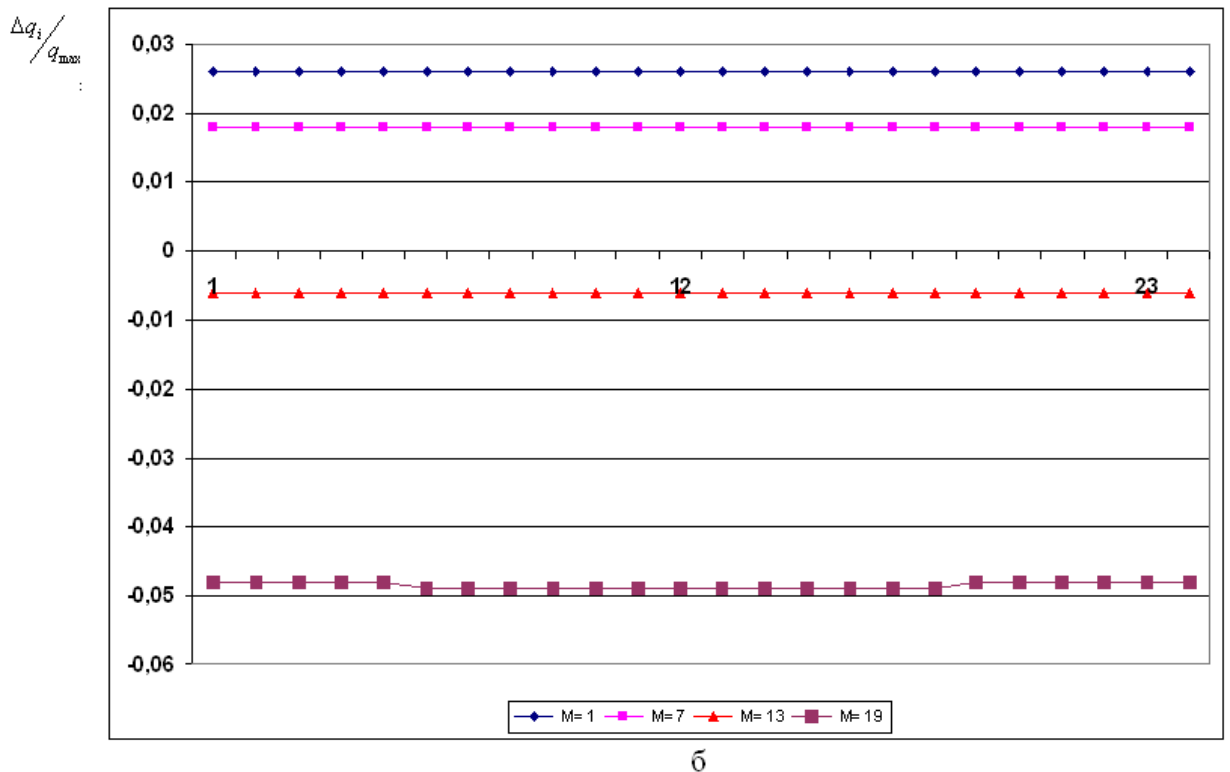
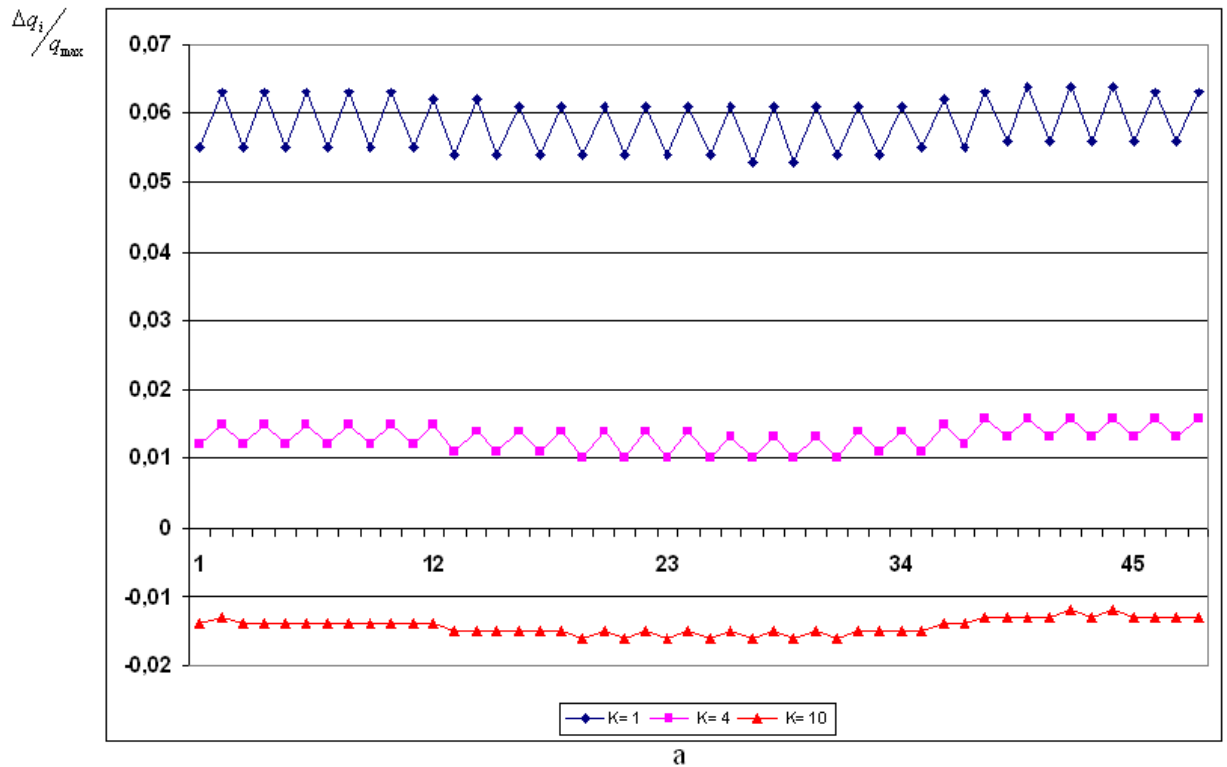


Рисунок 2.5 - Безразмерные погрешности моделирования расчетных тепловых нагрузок в точках поверхности цилиндрического объекта для третьего варианта теплового нагружения, а – боковая поверхность, б – торцевая поверхность

На графиках рисунков 2.3 – 2.5 приводятся локальные безразмерные погрешности $\Delta \bar{q}_i (i = 1, 2, \dots, N)$ воспроизведения расчетных значений плотности

поглощаемых внешних тепловых потоков для нескольких совокупностей элементов испытываемого объекта, сгруппированных следующим способом: элементы боковой (цилиндрической) поверхности сгруппированы по поясам, которые образованы соседними поперечными сечениями, а группы элементов торцевых поверхностей образованы соседними окружностями, с помощью которых торцевая поверхность (круг) делится на отдельные элементы. Безразмерные погрешности определялись отношением абсолютных погрешностей Δq_i к характерной величине, в качестве которой принималась максимальная плотность q_{\max} поглощенного внешнего потока, то есть

$\Delta \bar{q}_i = \frac{\Delta q_i}{q_{\max}}$. Для первого случая внешнего теплового нагружения величина q_{\max} составляла $402,6 \text{ Вт/м}^2$, для второго - $441,9 \text{ Вт/м}^2$, для третьего - 406 Вт/м^2 .

На рисунках 2.3 – 2.5 погрешности приводятся не для всех тепловоспринимающих элементов, а для элементов, которые содержатся в поясах К(1, 4, 10) боковой поверхности и поясах М(1, 7, 13, 19) торцевых поверхностей.

Помимо безразмерных локальных погрешностей моделирования внешних тепловых нагрузок, вычислялись среднеинтегральные и среднеквадратичные погрешности, обозначаемые $\Delta \bar{q}_{\text{инт}}$ и $\Delta \bar{q}_{\text{квд}}$. Оказалось, что для первого расчетного случая $\Delta \bar{q}_{\text{инт}} \approx 0$, $\Delta \bar{q}_{\text{квд}} = 0,1312$, для второго - $\Delta \bar{q}_{\text{инт}} = 0,0262$, $\Delta \bar{q}_{\text{квд}} = 0,1234$, для третьего - $\Delta \bar{q}_{\text{инт}} \approx 0$, $\Delta \bar{q}_{\text{квд}} = 0,0272$.

2.3 Методика определения режима работы имитационной системы, включающей в себя термоэкраны и совокупность галогенных ламп накаливания

2.3.1 Основные геометрические и радиационные характеристики имитатора

Рассматривается имитатор по конструктивной схеме, геометрическим и радиационным характеристикам в основном похожий на имитатор известной термобарокамеры CLIMATS.

В термобарокамере, где система вакуумирования обеспечивает поддержание вакуума на уровне 10^{-4} Па вокруг ее рабочей зоны размещаются 4 автономных термоэкрана, образующих почти замкнутую цилиндрическую поверхность диаметром D , соосную с поверхностью цилиндрической вакуумной камеры. Кроме того, в камере имеются два торцевых термоэкрана, ограничивающих вместе с боковыми экранами практически замкнутый цилиндрический объем длиной L . Торцевые экраны также автономны.

Введем в рассмотрение прямоугольную систему координат xuz с осью oz , совпадающей с продольной осью термовакуумной установки. Начало координат совместим с центральной точкой одного из торцевых экранов, который условимся называть нижним, а другой - верхним. Положение каждого из боковых экранов будем характеризовать двумя полярными углами $\beta_1(j)$ и $\beta_2(j)$, отсчитываемыми от оси ox . Предполагая, что соседние экраны располагаются вплотную друг к другу, можно определить величины углов $\beta_1(j)$ и $\beta_2(j)$ для $j = 1, 2, \dots, m$: $\beta_1(j) = \frac{2\pi \cdot (j-1)}{m}$, $\beta_2(j) = \frac{2\pi \cdot j}{m}$, где для рассматриваемого имитатора $m = 4$.

Пронумеруем термоэкраны, считая, что первый экран располагается в пределах полярных углов $\beta \in [0; \pi/2]$, второй - в пределах $\beta \in [\pi/2; \pi]$, для третьего - $\beta \in [\pi; 3/2\pi]$, для четвертого - $\beta \in [3/2\pi; 2\pi]$. Относительную длину

экранов $\bar{L} = L/D$ примем равной 1,5. Относительный диаметр торцевых экранов будем считать равным 1.

Со стороны рабочей зоны термовакуумной установки поверхности термоэкранов имеют диффузное покрытие, обладающее высокой степенью черноты ($\varepsilon \geq 0,94$) во всем диапазоне спектра теплового излучения.

Для расчета лучистого теплообмена испытуемого объекта с термоэкранами каждый из боковых экранов представлялся в виде совокупности 480 одинаковых по площади элементов. Экран делился на элементы 20 поперечными и 24 осевыми секущими плоскостями.

Разбиение торцевых экранов на мелкие площадки осуществлялось с помощью 20 окружностей с радиусами, изменяющимися с одинаковым шагом от 0 до $D/2$, и 24 прямыми, проходящих через центр круга под углами, изменяющимися от 0^0 до 360^0 с угловым шагом 15^0 .

Между испытуемым объектом и термоэкранами на некотором каркасе условно цилиндрической формы размещены, согласно приведенной на рисунке 1.3 схеме, 48 ламповых модулей, включающих в себя галогенные лампы накаливания. Ламповые модули размещаются поясами в трех поперечных сечениях имитатора. В каждом сечении установлены по 16 равномерно отстоящих друг от друга ламп. Одно сечение является центральным сечением, а два других расположены вблизи торцевых термоэкранов. Вблизи каждого торцевого термоэкрана в соответствии со схемой на рисунке 1.3 установлены по 8 торцевых ламповых модулей.

Спектральный состав испускаемого лампой излучения сильно зависит от подводимой к ней электрической мощности, поскольку это излучение в основном формируется системой “вольфрамовая спираль-колба”, поэтому представляется целесообразным пойти по пути изменения радиационно-оптических характеристик наружной поверхности колб ламп, производя, например, напыление на их поверхность непрозрачной и термостойкой пленки, обладающей высокой степенью черноты в средней и дальней инфракрасной

области спектра. Рассматривается именно такой вариант радиационно-оптической модели лампы. Длина излучающей части лампы принята равной $0,5\text{ м}$, а диаметр кварцевой колбы - 10^{-2} м .

2.3.2 Геометрическая модель испытуемого объекта

В качестве испытуемого объекта рассмотрим гипотетический объект с невогнутой формой наружной поверхности, например цилиндрический отсек с диаметром d и длиной l .

Линейные размеры экранов и испытуемого объекта будем относить к диаметру имитатора D . Относительный диаметр испытуемого объекта $\bar{d} = d/D$ примем равным $0,5$, а относительную длину $\bar{l} = l/D$ зададим равной $0,75$. Для расчета лучистого теплообмена испытуемого объекта в имитаторе необходимо знать координаты и ориентацию нормалей элементов поверхности объекта. Они могут задаваться двумя способами. Описанными в разделе 2.1.1.

Для всех трех анализируемых вариантов исполнения имитатора поверхность испытуемого объекта аппроксимировалась многогранной поверхностью одинаково. Боковая поверхность испытуемого объекта аппроксимировалась поверхностью многогранника с 912 треугольными гранями, находящихся в 19 поясах с 48 гранями в каждом поясе. Пояса образованы 20 поперечными сечениями цилиндрической поверхности, следующих друг за другом с одинаковым шагом $\Delta z = l/20$. Аппликата первого сечения равна 0, последнего - l . Каждая из торцевых частей испытуемого объекта представлялась как совокупность 480 мелких площадок. Разбиение торцевых частей объекта осуществлялось точно так же, как и разбиение торцевых термозэкранов.

В качестве радиационно-оптических характеристик поверхности объекта, характеризующих коэффициентом поглощения A_s поверхности по отношению к падающему солнечному излучению и степенью черноты ε , принимались

характеристики, широко применяемой для облицовки внешней поверхности экранно-вакуумной теплоизоляции (ЭВТИ) желтой арамидной ткани, у которой $A_s = 0,29$, а $\varepsilon = 0,55$. Поверхность считалась диффузной.

2.3.3 Методический подход к решению задачи определения оптимальных значений температур совокупности термоэкранов и величин электрических мощностей, подводимых к лампам

В качестве критерия оптимальности режима работы 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.

Величина погрешности 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 . При этом

$$q_i = \sum_{j=1}^n \pi \cdot A_{ij} \cdot \varphi_{di-j} \cdot J_j, \text{ где } A_{ij} - \text{интегральная поглощательная способность } i\text{-го}$$

элемента по отношению к излучению j -го излучателя; φ_{di-j} - локальный угловой коэффициент i -го элемента и j -го излучателя; k - число излучателей.

Заметим, что в выражение для q_i записано для диффузных излучающих и тепловоспринимающих элементов.

Для данной задачи целевую функцию можно записать в виде:

$$\psi(J_1, J_2, \dots, J_K) = \sum_{i=1}^N \left(\sum_{j=1}^n \pi \cdot A_{ij} \cdot \varphi_{di-j} \cdot J_j + \sum_{m=1}^6 \pi \cdot A_{ij} \cdot \varphi_{di-m} \cdot J_m - q_i^0 \right)^2, \quad (2.4.)$$

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 $J = (J_1, J_2, \dots, J_k)$ решается задача минимизации функции ψ как функции k переменных J_j , $j = 1, 2, \dots, k$ при следующих ограничениях на искомые величины J_j :

$$J_j(0) \geq 0, \quad (2.5)$$

$$I_j(0) \leq J_{\max}$$

где J_{\max} - максимально допустимая интенсивность излучения, зависящая от типа излучателя.

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

$$\sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^N a_{ij} \cdot a_{im} \cdot J_j = \sum_{i=1}^N a_{ik} \cdot q_i \quad (k = 1, 2, \dots, n+6), \quad (2.6)$$

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

Принимая во внимание условие (2.5), ограничивающее область значений J_j , для решения системы (2.6) использовался итерационный метод.

В выражение для целевой функции, а также в выражения для коэффициентов линейной системы (2.6) входят угловые коэффициенты двух типов: между тепловоспринимающими элементами и колбами ламп, а также угловые коэффициенты между тепловоспринимающими элементами и термоэкранами.

Методика расчета угловых коэффициентов между тепловоспринимающими элементами и термоэкранами уже изложена в предыдущем разделе данной главы.

Составим методику и алгоритм расчета облученности тепловоспринимающих элементов ламповыми модулями.

2.3.4 Методика и алгоритм расчета облученности тепловоспринимающих элементов ламповыми модулями

Введем следующие предположения:

Излучение, испускаемое модулем, исходит с поверхности колбы лампы (эффективной поверхности).

Каждый элемент эффективной поверхности излучает диффузно.

Локальная плотность излучения по всей эффективной поверхности одинакова.

Диаметр колбы бесконечно мал по сравнению с расстоянием до тепловоспринимающих элементов.

Спектральный состав исходящего от лампы излучения соответствует спектру излучения серого тела.

Условимся в дальнейшем, говоря об излучении лампового модуля, иметь в виду излучение, исходящее от цилиндрической поверхности с диаметром d и длиной l_0 , равными соответственно диаметру и длине колбы лампы.

Рассмотрим имитатор, в котором ламповые модули размещаются вдоль образующих поверхности кругового цилиндра и на ее торцевых плоскостях.

Расчет падающего на какой-то тепловоспринимающий элемент dF_i излучения, исходящего от какой-то j -ой лампы сводится в основном к определению локального углового коэффициента φ_{di-j} тепловоспринимающего элемента dF_i и излучающей поверхности F_j этой лампы поскольку плотность падающего на элемент dF_i потока излучения q_{di-j} определяется произведением $\varphi_{di-j} \cdot q_j$, где q_j плотность исходящего от j -ой лампы потока излучения.

Для расчета φ_{di-j} разделим цилиндрическую поверхность поперечными сечениями на элементарные участки длиной dl . Следует обратить внимание на то, что в направлении любого элемента тепловоспринимающей поверхности достаточно короткий элемент цилиндрической поверхности испускает

излучение практически как плоский элемент dF_j , ширина которого равна диаметру d , а нормаль \vec{n}_{dj} лежит в плоскости Ω , проходящей через ось лампы и вектор $\vec{\rho}_{dj-di}$ с началом в центральной точке этого плоского элемента и концом - в центральной точке элемента dF_i тепловоспринимающей поверхности (рисунок 2.6).

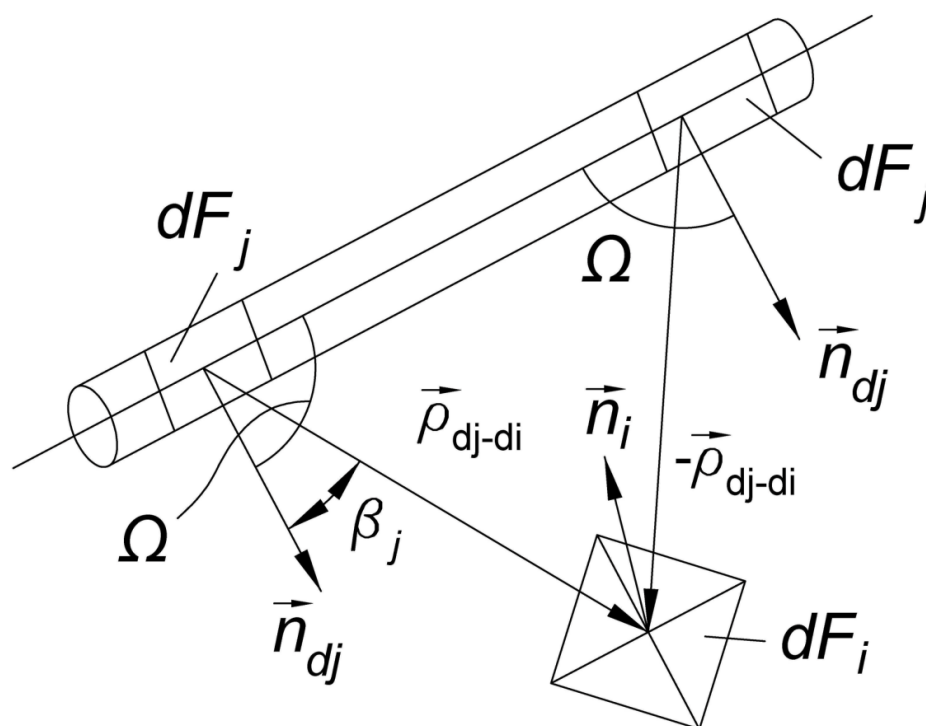


Рисунок 2.6 - Иллюстрация принципа замены элемента кварцевой колбы плоским элементом

Данное предположение может быть принято в связи с тем, что диаметр d цилиндрической поверхности во много раз меньше расстояния ρ до тепловоспринимающих элементов ($d/\rho \ll 1$). Действительно, если, например, диаметр цилиндрической поверхности (лампы) равен 10 мм, то расстояние до облучаемых элементов испытываемого объекта в крупных установках, как правило, не меньше 0,5 м. Вследствие этого лучи, исходящие из точек тепловоспринимающих элементов, можно считать параллельными. Так при $d/\rho=0.05$ угол расходимости лучей не превышает 3° . Это дает возможность заменять цилиндрические элементы плоскими элементами с ориентацией, изменяющейся в зависимости от взаимного расположения

тепловоспринимающего элемента и элемента лампы, что чрезвычайно упрощает решение задачи определения угловых коэффициентов.

Для составления алгоритма решения задачи введем в рассмотрение цилиндрическую систему координат, совместив ось OZ с продольной осью имитатора, а начало координат совместим с центральной точкой нижней торцевой плоскости. Полярную ось OX направим на первый вертикальный (условно) ряд ламповых модулей. Прямоугольная система координат, соответствующая введенной в рассмотрение цилиндрической, содержит ось OY , образующую с осями OX и OZ правую систему координат.

Координаты тепловоспринимающих элементов зададим в введенной в рассмотрение цилиндрической системе, связанной с имитатором. Положение i -ого тепловоспринимающего элемента будем определять величинами полярного радиуса r_i , полярного угла γ_i и величиной аппликаты z_i . Если обозначить через \vec{n}_{di} нормаль тепловоспринимающего элемента dF_i , то ориентацию тепловоспринимающих элементов будем характеризовать двумя углами α_i и β_i , где α_i - угол между нормалью и плоскостью XOY , а β_i - угол между проекцией нормали на плоскость XOY и полярным радиусом r_i элемента.

Исходное выражение для φ_{di-j} можно получить, рассматривая следующее известное [2] соотношение для плотности потока излучения, падающего на элемент dF_i от j -ой лампы:

$$q_{di-j} = I_j \cdot \pi \cdot \int_{F_j} \frac{\cos \omega_{di-\rho} \cdot \cos \omega_{dj-\rho}}{\pi \cdot (\vec{\rho}_{dj-di})^2} dF_j, \quad (2.7)$$

где I_j - интенсивность исходящего от j - лампы излучения, $\omega_{di-\rho}$ - угол между \vec{n}_{di} и $\vec{\rho}_{di-dj}$, $\omega_{dj-\rho}$ - угол между \vec{n}_{dj} и $\vec{\rho}_{dj-di}$, $\vec{\rho}_{di-dj} = -\vec{\rho}_{dj-di}$.

$$\text{При этом } \cos \omega_{di-\rho} = \frac{\vec{n}_{di} \cdot \vec{\rho}_{di-dj} + |\vec{n}_{di} \cdot \vec{\rho}_{di-dj}|}{2 \cdot |\vec{\rho}_{di-dj}|}, \quad (2.8)$$

$$\cos \omega_{dj-\rho} = \frac{\vec{n}_{dj} \cdot \vec{\rho}_{dj-di} + |\vec{n}_{dj} \cdot \vec{\rho}_{dj-di}|}{2 \cdot |\vec{\rho}_{dj-di}|}. \quad (2.9)$$

Интеграл в выражении (2.7) имеет смысл локального углового коэффициента φ_{di-j} тепловоспринимающего элемента dF_i и j -го лампового излучателя.

В связи с принятым предположением о малости диаметра лампы по сравнению с расстоянием до тепловоспринимающих элементов интегрирование по поверхности F_j можно заменить интегрированием по длине лампы. То есть будем считать $dF_j = d \cdot dl$.

Рассмотрим последовательно два отмеченных способа размещения излучателей: вдоль образующих прямых поверхности кругового цилиндра и на торцевых плоскостях.

Лампы расположены на цилиндрической поверхности

В заданной системе координат положение некоторой j -ой лампы будем характеризовать полярным радиусом R_j , полярным углом γ_j , аппликатами $z_{j,1}$ и $z_{j,2}$ нижнего и верхнего (условно) концов лампы. Тогда цилиндрические координаты элемента dF_j лампы будут характеризоваться параметрами R_j, γ_j, z , где $z \in [z_{1,j}; z_{2,j}]$, а $dF_j = d \cdot dz$.

Используя приведенную на рисунке 2.7 расчетную схему, выразим интеграл в соотношении (2.7) через параметры, характеризующие координаты и ориентацию тепловоспринимающих элементов и элементов излучателей.

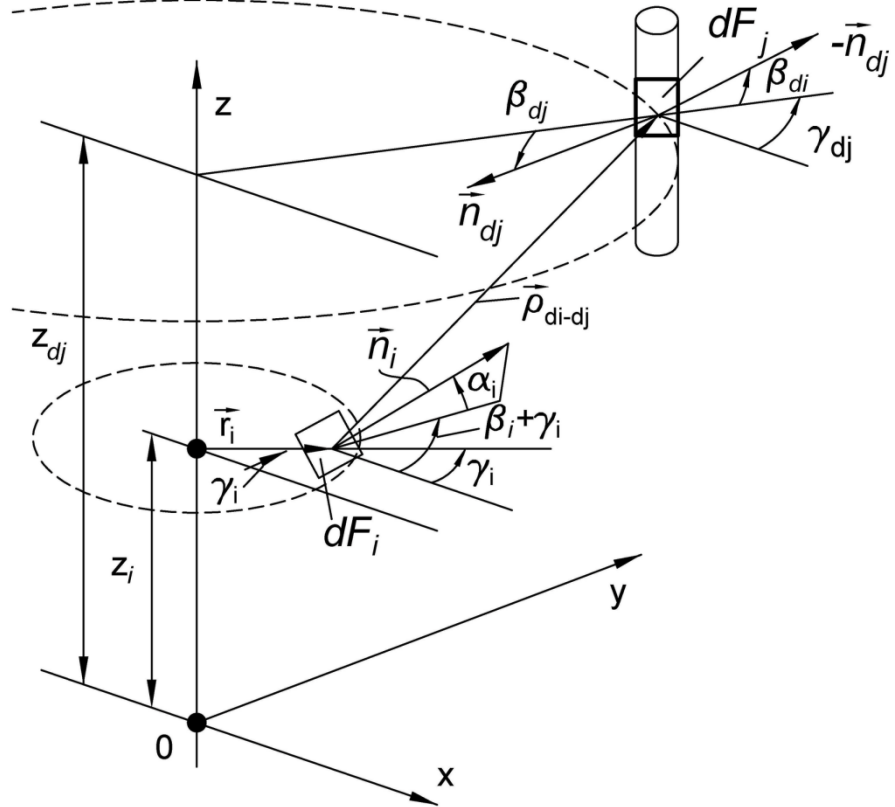


Рисунок 2.7 - Схема для расчета локального углового коэффициента между тепловоспринимающим элементом dF_i и поверхностью лампы, расположенной на образующей прямой цилиндрической поверхности имитатора

Из рисунка следует, что $\vec{n}_{di} = \{(\cos \alpha_i \cdot \cos(\gamma_i + \beta_i)); (\cos \alpha_i \cdot \sin(\gamma_i + \beta_i)); \sin \alpha_i\}$,

$\vec{\rho}_{di-dj} = \{\rho_x; \rho_y; \rho_z\}$, где $\rho_x = R_{dj} \cdot \cos \gamma_{dj} - r_i \cdot \cos \gamma_i$, $\rho_y = R_{dj} \cdot \sin \gamma_{dj} - r_i \cdot \sin \gamma_i$, $\rho_z = z_{dj} - z_i$,

$$|\vec{\rho}_{di-dj}| = \sqrt{R_{dj}^2 + r_i^2 - 2R_{dj} \cdot r_i \cdot \cos(\gamma_{dj} - \gamma_i) + (z_{dj} - z_i)^2}$$

$$\vec{n}_{dj} = \left\{ -\frac{\rho_x}{\sqrt{\rho_x^2 + \rho_y^2}}; -\frac{\rho_y}{\sqrt{\rho_x^2 + \rho_y^2}}; 0 \right\} \quad (2.10)$$

Перемножив скалярно векторы \vec{n}_{di} и $\vec{\rho}_{di-dj}$, после простых упрощающих преобразований получим выражение для $\vec{n}_{di} \cdot \vec{\rho}_{di-dj}$, входящее в соотношение (2.7):

$$\vec{n}_{di} \cdot \vec{\rho}_{di-dj} = \cos \alpha_i \cdot (R_j \cdot \cos(\gamma_i + \beta_i - \gamma_j) - r_i \cdot \cos \beta_i) + \sin \alpha_i \cdot (z_{dj} - z_i).$$

После скалярного перемножения векторов \vec{n}_{dj} и $\vec{\rho}_{dj-di}$ получим выражение для $\vec{n}_{dj} \cdot \vec{\rho}_{dj-di}$, входящее в соотношение (2.7):

$$\begin{aligned} \vec{n}_{dj} \cdot \vec{\rho}_{dj-di} &= \sqrt{\rho_X^2 + \rho_Y^2} \text{ или} \\ \vec{n}_{dj} \cdot \vec{\rho}_{dj-di} &= \sqrt{R_{dj}^2 + r_i^2 - 2R_{dj} \cdot r_i \cdot \cos(\gamma_{dj} - \gamma_i)} \end{aligned} \quad (2.11)$$

Подставив соотношения (2.8 -2.11) в (2.7), получим следующее выражение для локального углового коэффициента φ_{di-j} :

$$\varphi_{di-j} = \int_{z_{1,j}}^{z_{2,j}} (R_{dj}^2 + r_i^2 - 2R_{dj} \cdot r_i \cdot \cos(\gamma_{dj} - \gamma_i)) \cdot \frac{C + |C|}{2 \cdot \pi \cdot B^2} \cdot d \cdot dz, \quad (2.12)$$

где $B = R_{dj}^2 + r_i^2 - 2R_{dj} \cdot r_i \cdot \cos(\gamma_{dj} - \gamma_i) + (z_{dj} - z_i)^2$,

$$C = \cos \alpha_i \cdot (R_j \cdot \cos(\gamma_i + \beta_i - \gamma_j) - r_i \cdot \cos \beta_i) + \sin \alpha_i \cdot (z_{dj} - z_i).$$

Лампы расположены на торцевой плоскости

Рассмотри случай, когда лампы расположены в торцевых плоскостях так, что их продольные оси касаются соосных окружностей, центры которых находятся на оси имитатора. При этом точками касания являются центральные точки ламп. Положение какой-то лампы под номером j на торцевой плоскости будем определять полярным радиусом R_j^0 центральной точки и полярным углом γ_j^0 этой точки. Цилиндрические координаты элемента лампы dl обозначим через R_{dj} , γ_{dj} и z_T^0 . Согласно схеме на рисунке 2.8

$$R_{dj} = \sqrt{(R_j^0)^2 + l^2}, \quad \gamma_{dj} = \gamma_j^0 + \arctg\left(\frac{l}{R_j^0}\right). \quad (2.14)$$

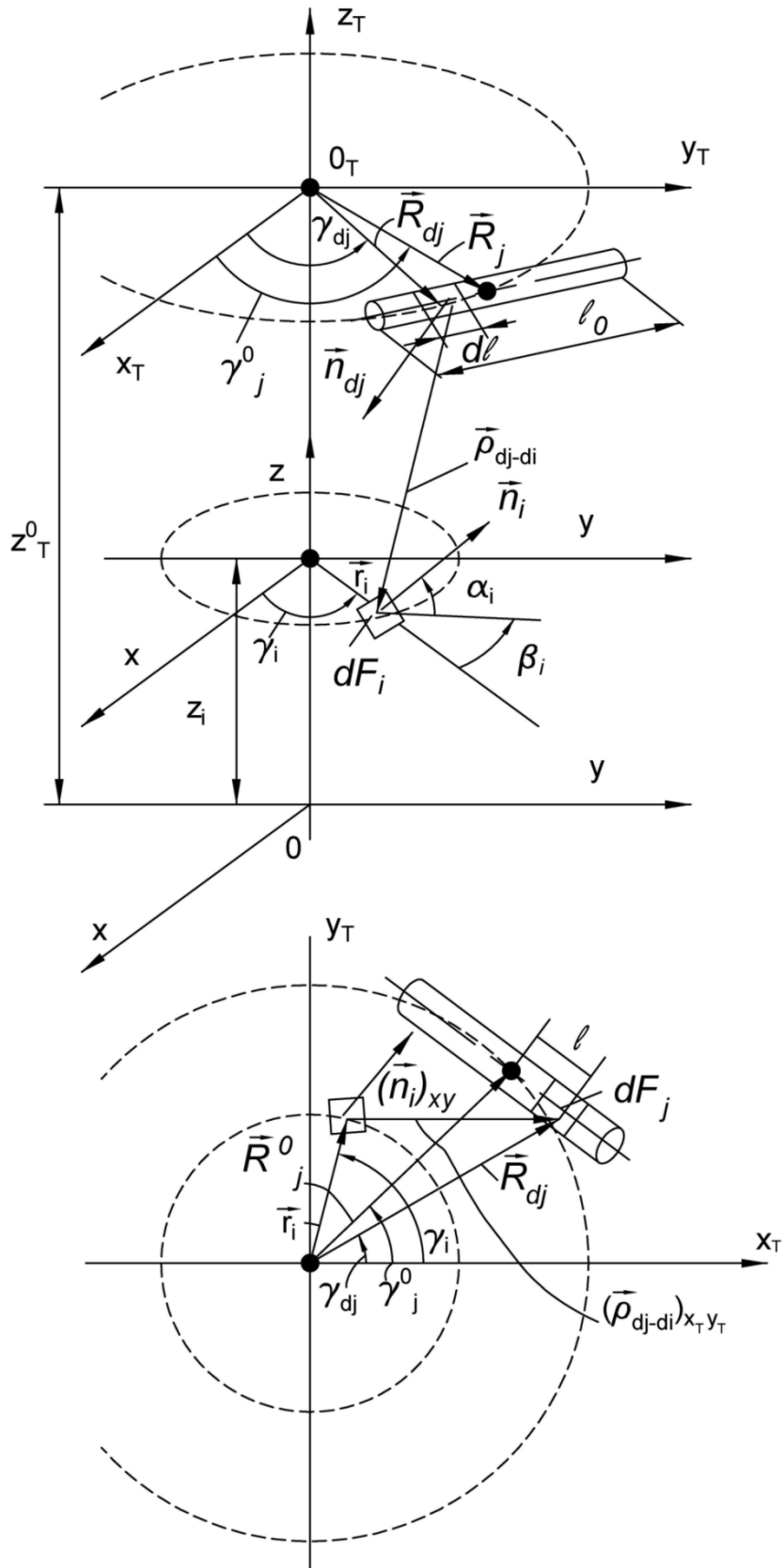


Рисунок 2.8 - Схема для расчета локального углового коэффициента между тепловоспринимающим элементом dF_i и поверхностью лампы, расположенной на торцевой плоскости имитатора

Используя эту же схему, выразим интеграл в соотношении (2.7) через параметры, характеризующие координаты и ориентацию тепловоспринимающих элементов и элементов излучателей. Из рисунка следует, что $\vec{n}_{di} = \{(\cos \alpha_i \cdot \cos(\gamma_i + \beta_i)); (\cos \alpha_i \cdot \sin(\gamma_i + \beta_i)); \sin \alpha_i\}$;

$$\vec{\rho}_{di-dj} = \{\rho_x; \rho_y; \rho_z\}, \text{ где } \rho_x = R_{dj} \cdot \cos \gamma_{dj} - r_i \cdot \cos \gamma_i, \quad \rho_y = R_{dj} \cdot \sin \gamma_{dj} - r_i \cdot \sin \gamma_i, \quad \rho_z = z_T^0 - z_i;$$

$$\vec{\rho}_{dj-di} = -\vec{\rho}_{di-dj};$$

$$|\vec{\rho}_{di-dj}| = \sqrt{R_{dj}^2 + r_i^2 - 2R_{dj} \cdot r_i \cdot \cos(\gamma_{dj} - \gamma_i) + (z_T^0 - z_i)^2}; \quad (2.15)$$

Для определения координат вектора \vec{n}_{dj} введем в рассмотрение угол δ_{dj} между вектором $\vec{\rho}_{dj-di}$ и единичным вектором, направленным по оси $-oz$. Согласно схеме на рисунке 2.5,

$$\vec{n}_{dj} = \{\sin \delta_{\rho} \cdot (-\cos \gamma_j^0); \sin \delta_{\rho} \cdot (-\sin \gamma_j^0); \frac{z_i - z_i^0}{|\vec{\rho}_{dj-di}|}\} \cdot \sin \delta_{\rho} = \sqrt{1 - \cos^2 \delta_{\rho}}, \text{ где}$$

$$\cos \delta_{\rho} = \frac{z_T^0 - z_i}{|\vec{\rho}_{dj-di}|}.$$

$$\text{Следовательно, } \vec{n}_{dj} = \{-\cos \gamma_j^0 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{z_i - z_i^0}{|\vec{\rho}_{dj-di}|}\right)^2}; -\sin \gamma_j^0 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{z_i - z_i^0}{|\vec{\rho}_{dj-di}|}\right)^2}; \frac{z_i - z_i^0}{|\vec{\rho}_{dj-di}|}\}.$$

В итоге входящие в соотношения (2.8) и (2.9) скалярные произведения $\vec{n}_{di} \cdot \vec{\rho}_{di-dj}$ и $\vec{n}_{dj} \cdot \vec{\rho}_{dj-di}$ можно записать в следующем виде:

$$\vec{n}_{di} \cdot \vec{\rho}_{di-dj} = \cos \alpha_i \cdot (R_{dj} \cdot \cos(\gamma_i + \beta_i - \gamma_{dj}) - r_i \cdot \cos \beta_i) + \sin \alpha_i \cdot (z_T^0 - z_i), \quad (2.16)$$

$$\begin{aligned} \vec{n}_{dj} \cdot \vec{\rho}_{dj-di} &= \cos \gamma_j^0 \cdot (R_{dj} \cdot \cos \gamma_{dj} - r_i \cdot \cos \gamma_i) \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{z_i - z_i^0}{|\vec{\rho}_{dj-di}|}\right)^2} + \\ &+ \sin \gamma_j^0 \cdot (R_{dj} \cdot \sin \gamma_{dj} - r_i \cdot \sin \gamma_i) \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{z_i - z_i^0}{|\vec{\rho}_{dj-di}|}\right)^2} + \frac{(z_i - z_T^0)^2}{|\vec{\rho}_{dj-di}|}, \end{aligned} \quad (2.17)$$

$$\text{где } R_{dj} = \sqrt{(R_j^0)^2 + l^2}, \quad \gamma_{dj} = \gamma_j^0 + \arctg\left(\frac{l}{R_j^0}\right), \quad l \in \left[-\frac{l_0}{2}; \frac{l_0}{2}\right]. \quad (2.18)$$

Подставив в соотношение (2.7) выражения (2.16) для скалярных произведений $\vec{n}_{di} \cdot \vec{\rho}_{di-dj}$, $\vec{n}_{dj} \cdot \vec{\rho}_{dj-di}$ и выражения (2.15), (2.18) для $|\vec{\rho}_{dj-di}|$, R_{dj} , γ_{dj} ,

получим расчетную формулу для локального углового коэффициента φ_{di-j} , в которой подинтегральная функция зависит от переменной l , изменяющейся в пределах $[-l_0/2; l_0/2]$.

2.3.5 Исследование корректности разработанного алгоритма определения локальных угловых коэффициентов для ламповых модулей

Применительно к имитаторам с ленточными излучателями имеются хорошо апробированные методики выбора оптимальных (с точки зрения достижения максимально возможной точности моделирования внешних тепловых нагрузок) энергетических режимов работы модулей имитаторов [3,4]. При реализации этих методик непременно осуществляется расчет локальных угловых коэффициентов между тепловоспринимающими элементами испытуемых объектов и модулями имитатора. Благодаря этому открывается возможность проверки характеризуемой в предыдущем разделе методики и алгоритма путем сопоставления режимов и результатов работы двух имитаторов, отличающихся лишь тем, что в одном из них излучатели являются ленточными, а в другом – ламповыми. Будем считать, что спектр излучения модулей как в одном, так и в другом имитаторе соответствует спектру излучения серого тела, а $l \gg d$.

Для проверки воспользуемся компьютерной программой, отличающейся от известных и апробированных программ, составленных для имитаторов с ленточными излучателями, лишь программными модулями, в которых реализованы разработанные алгоритмы определения локальных угловых коэффициентов для имитаторов с ламповыми модулями.

Для определенности предполагалось, что сопоставляемые имитаторы имеют диаметр 4 м и длину 5 м. На боковых поверхностях каждого имитатора размещены излучающие модули с длиной, равной 1 м. Эти модули установлены в 5 поясах, следующих друг за другом без промежутков. В каждом поясе с

одинаковым угловым шагом $\gamma=15^\circ$ размещаются 24 модуля. На торцевых поверхностях имитаторов установлены 8 модулей, касающихся окружностей с радиусами 0.5 м и 1 м. Четыре внутренних модуля образуют квадрат со стороной 1 м, а внешние симметрично размещаются на сторонах квадрата со стороной 2 м. Ширина ленточного излучателя принималась равной диаметру кварцевой лампы $d=10$ мм.

В качестве испытуемых объектов рассматривались объекты цилиндрической формы с диаметром $D_1 \in [0,5;3]$ м и длиной $L_1 = [1;4]$ м.

Боковая поверхность испытуемого объекта аппроксимировалась поверхностью многогранника с 912 треугольными гранями, находящихся в 19 поясах с 48 гранями в каждом поясе. Пояса образованы 20 поперечными сечениями цилиндрической поверхности, следующих друг за другом с одинаковым шагом $\Delta z = \frac{L_1}{20}$. Аппликата первого сечения равна 0, последнего - L_1 . Тепловоспринимающими элементами боковой поверхности объекта принимались элементарные площадки, находящиеся в центральных точках граней.

Каждая из торцевых частей испытуемого объекта представлялась как совокупность 480 частей, в центре каждой из которых находится элементарная площадка. Разбиение торцевых поверхностей осуществлялось с помощью системы из 10 окружностей с радиусами, изменяющимися с одинаковым шагом от 0 до $\frac{D_1}{2}$, и прямых, проходящих через центр круга под углом, изменяющимися с шагом $7,5^\circ$. Всего на поверхности объекта, следовательно, выделялось 1872 тепловоспринимающих элементов (элементарных площадок).

В качестве радиационно-оптических характеристик поверхности объекта, характеризующих коэффициентом поглощения A_s поверхности по отношению к падающему солнечному излучению и степенью черноты ε , принимались характеристики широко применяемой в космической технике облицовочной

для экранно-вакуумной теплоизоляции арамидной ткани, у которой $A_s = 0,29$, а $\varepsilon = 0,55$.

Предполагалось, что поверхность испытуемого объекта располагается симметрично относительно поверхности имитатора. 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°). Считалось, что продольная ось oz объекта параллельна поверхности Земли, ось ox направлена к ее центру, а ось $-ox$ направлена на Солнце. Сферическое альbedo Земли (a_{cf}) принималось равным 0,35, а величина солнечной постоянной $S = 1400 \frac{вт}{м^2}$.

Расчет плотности падающих на элементы испытуемого объекта тепловых потоков от Солнца и Земли осуществлялся по известной методике [1].

Для выбранных геометрических и радиационных моделей сопоставляемых имитаторов и испытуемого объекта осуществлялся расчет локальных угловых коэффициентов, которые используются при определении режима работы каждого из сопоставляемых имитаторов. Режим определялся совокупностью значений интенсивностей излучения модулей имитаторов. Эти значения использовались для расчета локальных погрешностей воспроизведения заданных значений плотности потоков излучения, поглощаемых элементами поверхности испытываемого объекта.

Наибольший интерес представляют результаты, полученные для двух крайних случаев: 1) размеры испытуемого объекта малы по сравнению с размерами имитатора; 2) размеры испытуемого объекта сопоставимы с размерами имитатора.

Пусть D и D_1 диаметры соответственно имитатора и объекта, а L и L_1 - их длины.

В первом случае $D_1 \ll D$, $L_1 \ll L$. Очевидно, что при этом условии результаты расчетов локальных угловых коэффициентов для ламповых и ленточных излучателей должны отличаться незначительно из-за малой

расходимости лучей, исходящих от излучателей в направлении испытуемого объекта.

Во втором случае из-за большого отличия индикатрис излучения модулей сопоставляемых имитаторов величины угловых коэффициентов должны отличаться существенно, что влечет за собой различия в определяемых режимах работы имитаторов, следовательно, и различия в величинах погрешностей моделирования заданных тепловых потоков на элементы испытываемых объектов. В силу того, что в плоскости, перпендикулярной оси излучателя, направленная сила излучения у лампы не зависит от направления, а у плоского излучателя изменяется по закону Ламберта, возможности лампового имитатора в отношении точности моделирования внешних тепловых нагрузок должны быть выше по сравнению с имитатором на основе ленточных излучателей.

Приведенные соображения качественного характера убедительно подтверждаются результатами расчетов, некоторые из которых представлены на графиках рисунков 2.9 и 2.10.

На графиках рисунков 2.9 и 2.10 приводятся результаты расчетов локальных безразмерных погрешностей $\Delta\bar{q}_i (i = 1, 2, \dots, N)$ моделирования заданных внешних тепловых нагрузок $q_w(I)$, полученные для второго расчетного случая, когда размеры испытываемого объекта ($D_1 = 3\text{ м}$, $L_1 = 4\text{ м}$) соизмеримы с размерами имитатора ($D = 4\text{ м}$, $L = 5\text{ м}$). Число N тепловоспринимающих элементов задавалось равным 1872.

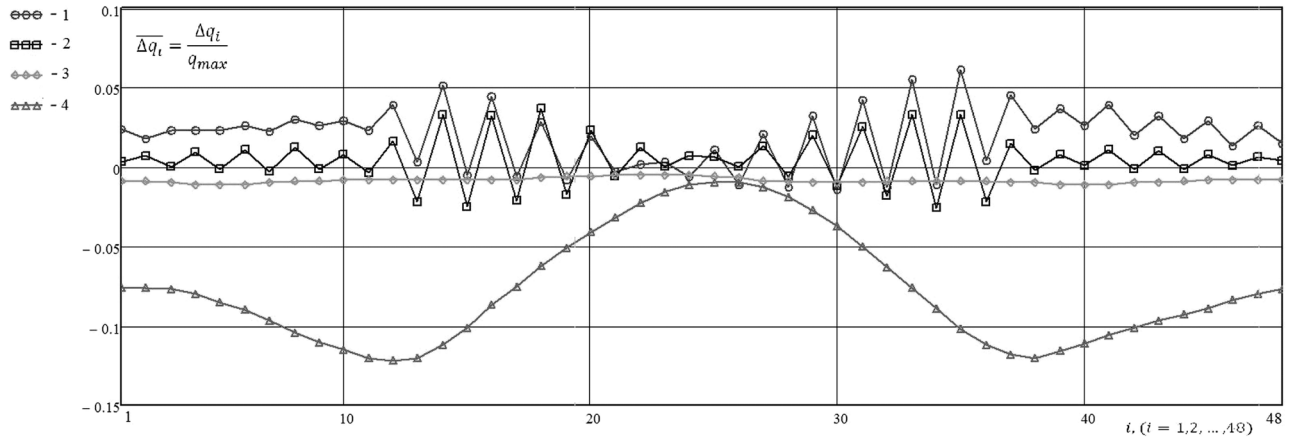


Рисунок 2.9 - Безразмерные погрешности моделирования заданных тепловых нагрузок в имитаторе с ламповыми модулями в случае, когда размеры имитатора ненамного превышают размеры испытываемого объекта

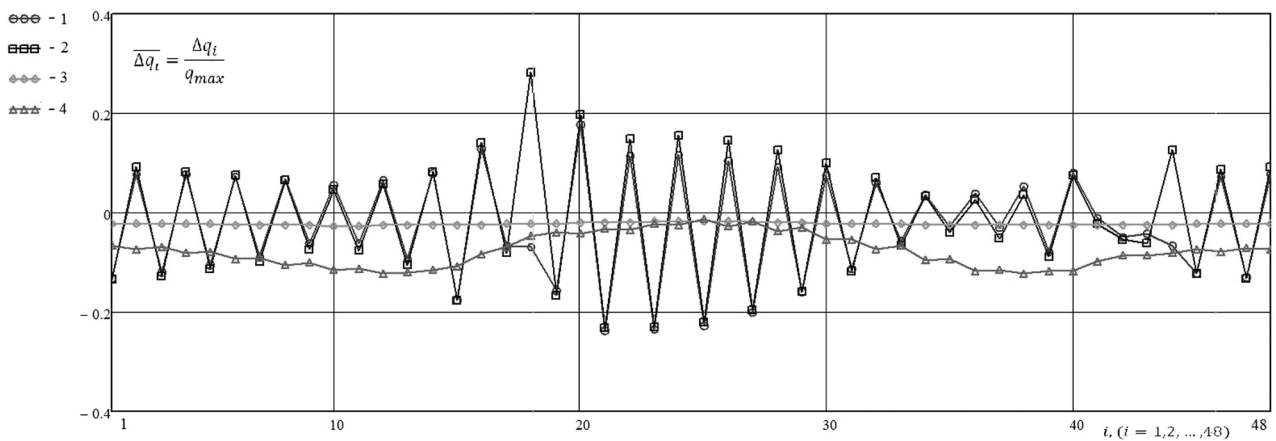


Рисунок 2.10 - Безразмерные погрешности моделирования заданных тепловых нагрузок в имитаторе с ленточными модулями в случае, когда размеры имитатора ненамного превышают размеры испытываемого объекта

Графики рисунка 2.9 относятся к имитатору с ламповыми модулями, а графики рисунка 2.10 - к имитатору с ленточными излучателями. Безразмерные погрешности определялись отношением абсолютных погрешностей Δq_i ($i = 1, 2, \dots, N$) к характерной величине, в качестве которой принималась максимальная локальная плотность q_{\max} поглощенного внешнего теплового потока, то есть $\Delta \bar{q}_i = \frac{\Delta q_i}{q_{\max}}$. Для рассматриваемого случая внешнего теплового нагружения величина q_{\max} составляет $403 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$.

Погрешности на графиках представлены не для всех элементов испытываемого объекта, а лишь для нескольких их совокупностей, сгруппированных следующим способом: элементы боковой (цилиндрической) поверхности сгруппированы по поясам, которые образованы соседними поперечными сечениями, а группы элементов торцевых поверхностей образованы соседними окружностями, с помощью которых торцевая поверхность (круг) делится на отдельные элементы. На всех графиках приводятся погрешности, которые имеют место для элементарных площадок содержащихся в первом (кривая 1) и центральном (кривая 2) поясах боковой поверхности и в первом (кривая 3) и последнем (кривая 4) поясах торцевых поверхностей. На оси абсцисс графиков нанесены номера элементарных площадок в поясе, для которых определены погрешности, отображенные на оси ординат.

Сравнивая полученные результаты, можно заключить, что в ламповом имитаторе погрешности моделирования значительно меньше (как и предполагалось), чем в имитаторе с линейчатыми излучателями. При этом среднеквадратичные безразмерные погрешности в ламповом имитаторе не превышают величину 0,043, а в имитаторе с ленточными излучателями достигают величины 0,089.

Значительный интерес представляет разница локальных погрешностей в сопоставляемых имитаторах, отнесенная к характерной величине, в качестве которой целесообразно взять максимальную по модулю локальную погрешность, допустим, в имитаторе с ленточными излучателями. Величины таких погрешностей, обозначенные $d\Delta\bar{q}_i$, представлены на графиках рисунка 2.11.

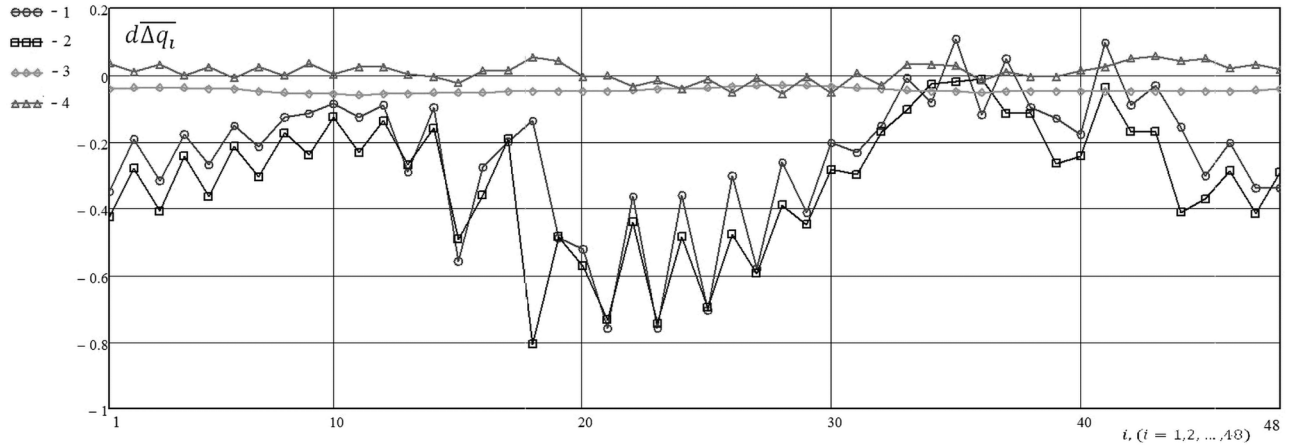


Рисунок 2.11 - Отличие погрешностей моделирования в имитаторах с ламповыми и ленточными модулями в случае, когда размеры имитатора и испытываемого объекта соизмеримы

При моделировании первого расчетного случая ($D_1 \ll D$, $L_1 \ll L$) предполагалось, что $D_1 = 0,5 м$ при $D = 4 м$, а $L_1 = 1 м$ при $L = 5 м$.

На графиках рисунка 2.12 приведены для этого случая значения $d\Delta\bar{q}_i$ для тепловоспринимающих элементов, принадлежащих, как и во втором рассмотренном случае, четырем характерным сечениям поверхности исследуемого объекта.

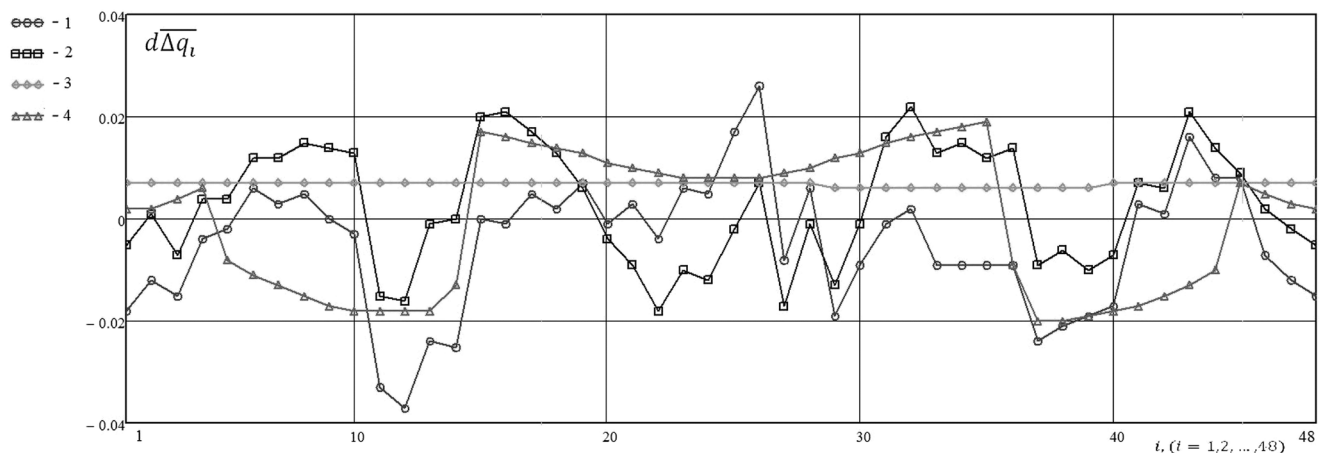


Рисунок 2.12 - Отличие погрешностей моделирования в имитаторах с ламповыми и ленточными модулями в случае, когда размеры испытываемого объекта малы по сравнению с размерами имитатора

Разница локальных погрешностей в сопоставляемых имитаторах, отнесенная к характерной величине, не превышает 3,7%. При этом

среднеквадратичные погрешности воспроизведения заданных тепловых нагрузок в сравниваемых имитаторах мало отличаются: в одном она составляет величину 0,00975, в другом – 0,00967.

Полученные результаты расчетов подтверждают косвенным путем правильность алгоритма расчета локальных угловых коэффициентов в ламповом имитаторе.

2.4 Оценка эффективности совместного использования термоэкранов и ламповых модулей в качестве имитатора внешних тепловых нагрузок

Сопоставлялись погрешности моделирования тепловых нагрузок для трех способов их реализации: 1) с использованием термоэкранов; 2) с использованием ламповых модулей; 3) совместное использование термоэкранов и ламповых модулей.

2.4.1 Основные геометрические и радиационные характеристики имитатора

Рассматривается имитатор по конструктивной схеме, геометрическим и радиационным характеристикам в основном похожий на имитатор известной термобарокамеры CLIMATS.

В термобарокамере, где система вакуумирования обеспечивает поддержание вакуума на уровне 10^{-4} Па, вокруг ее рабочей зоны размещаются 4 автономных термоэкрана, образующих почти замкнутую цилиндрическую поверхность диаметром D , соосную с поверхностью цилиндрической вакуумной камеры. Кроме того, в камере имеются два торцевых термоэкрана, ограничивающих вместе с боковыми экранами практически замкнутый цилиндрический объем длиной L . Торцевые экраны также автономны.

Введем в рассмотрение прямоугольную систему координат x, y, z с осью oz , совпадающей с продольной осью термовакуумной установки. Начало

координат совместим с центральной точкой одного из торцевых экранов, который условимся называть нижним, а другой - верхним. Положение каждого из боковых экранов будем характеризовать двумя полярными углами $\beta_1(j)$ и $\beta_2(j)$, отсчитываемыми от оси ox . (см. рисунок 1.3). Предполагая, что соседние экраны располагаются вплотную друг к другу, можно определить величины углов $\beta_1(j)$ и $\beta_2(j)$ для $j = 1, 2, \dots, m$: $\beta_1(j) = \frac{2\pi \cdot (j-1)}{m}$, $\beta_2(j) = \frac{2\pi \cdot j}{m}$, где для рассматриваемого имитатора $m = 4$.

Пронумеруем термоэкраны, считая, что первый экран располагается в пределах полярных углов $\beta \in [0; \pi/2]$, второй - в пределах $\beta \in [\pi/2; \pi]$, для третьего - $\beta \in [\pi; 3/2\pi]$, для четвертого - $\beta \in [3/2\pi; 2\pi]$. Относительную длину экранов $\bar{L} = L/D$ примем равной 1,5. Относительный диаметр торцевых экранов будем считать равным 1.

Со стороны рабочей зоны термовакуумной установки поверхности термоэкранов имеют диффузное покрытие, обладающее высокой степенью черноты ($\varepsilon \geq 0,94$) во всем диапазоне спектра теплового излучения.

Для расчета лучистого теплообмена испытуемого объекта с термоэкранами каждый из боковых экранов представлялся в виде совокупности 480 одинаковых по площади элементов. Экран делился на элементы 20 поперечными и 24 осевыми секущими плоскостями.

Разбиение торцевых экранов на мелкие площадки осуществлялось с помощью 20 окружностей с радиусами, изменяющимися с одинаковым шагом от 0 до $D/2$, и 24 прямыми, проходящих через центр круга под углами, изменяющимися от 0 до 360° с угловым шагом 15° .

Между испытуемым объектом и термоэкранами на некотором каркасе условно цилиндрической формы размещены, согласно приведенной на рисунке 1.4 схеме, 48 ламповых модулей, включающих в себя галогенные лампы накаливания. Ламповые модули размещаются поясами в трех поперечных сечениях имитатора. В каждом сечении установлены по 16 равномерно

отстоящих друг от друга ламп. Одно сечение является центральным сечением, а два других расположены вблизи торцевых термоэкранов. Вблизи каждого торцевого термоэкрана в соответствии со схемой на рисунке 1.4 установлены по 8 торцевых ламповых модулей.

Спектральный состав испускаемого лампой излучения сильно зависит от подводимой к ней электрической мощности, поскольку это излучение в основном формируется системой “вольфрамовая спираль-колба”, поэтому представляется целесообразным пойти по пути изменения радиационно-оптических характеристик наружной поверхности колб ламп, произведя, например, напыление на их поверхность непрозрачной и термостойкой пленки, обладающей высокой степенью черноты в средней и дальней инфракрасной области спектра. Именно такой вариант радиационно-оптической модели лампы здесь рассматривается. Длина излучающей части лампы принята равной 0,5 м, а диаметр кварцевой колбы – 10^{-2} м.

2.4.2 Геометрическая модель испытываемого объекта

В качестве испытываемого объекта рассмотрим гипотетический объект с невогнутой формой наружной поверхности, например цилиндрический отсек с диаметром d и длиной l .

Линейные размеры экранов и испытываемого объекта будем относить к диаметру имитатора D . Относительный диаметр испытываемого объекта $\bar{d} = d/D$ примем равным 0,5, а относительную длину $\bar{l} = l/D$ зададим равной 0,75.

Для всех трех анализируемых вариантов исполнения имитатора поверхность испытываемого объекта аппроксимировалась многогранной поверхностью одинаково. Боковая поверхность испытываемого объекта аппроксимировалась поверхностью многогранника с 912 треугольными гранями, находящихся в 19 поясах с 48 гранями в каждом поясе. Пояса образованы 20 поперечными сечениями цилиндрической поверхности,

следующих друг за другом с одинаковым шагом $\Delta z = l/20$. Аппликата первого сечения равна 0, последнего - l . Каждая из торцевых частей испытуемого объекта представлялась как совокупность 480 мелких площадок. Разбиение торцевых частей объекта осуществлялось точно так же, как и разбиение торцевых термоэкранов.

В качестве радиационно-оптических характеристик поверхности объекта, характеризующих коэффициентом поглощения A_s поверхности по отношению к падающему солнечному излучению и степенью черноты ε , принимались характеристики, широко применяемой для облицовки внешней поверхности ЭВТИ желтой арамидной ткани, у которой $A_s = 0,29$, а $\varepsilon = 0,55$. Поверхность считалась диффузной.

Методический подход к решению задачи определения оптимальных значений температур совокупности термоэкранов и величин электрических мощностей, подводимых к лампам рассматривался в подразделе 2.3.3 данной диссертации.

Полученные в результате решения задачи абсолютные размерные погрешности моделирования расчетных значений тепловых нагрузок относились к некоторой характерной величине. В качестве такой величины в данной диссертации, как и в работах [3,5] принята максимальная величина q_i^0 , равная для рассматриваемого случая внешнего теплового нагружения $403 \frac{вт}{м^2}$.

2.4.3 Результаты оценки эффективности совместного использования термоэкранов и ламповых модулей в качестве имитатора внешних тепловых нагрузок

Как уже отмечалось, сопоставлялись погрешности моделирования тепловых нагрузок для трех способов их реализации: 1) с использованием

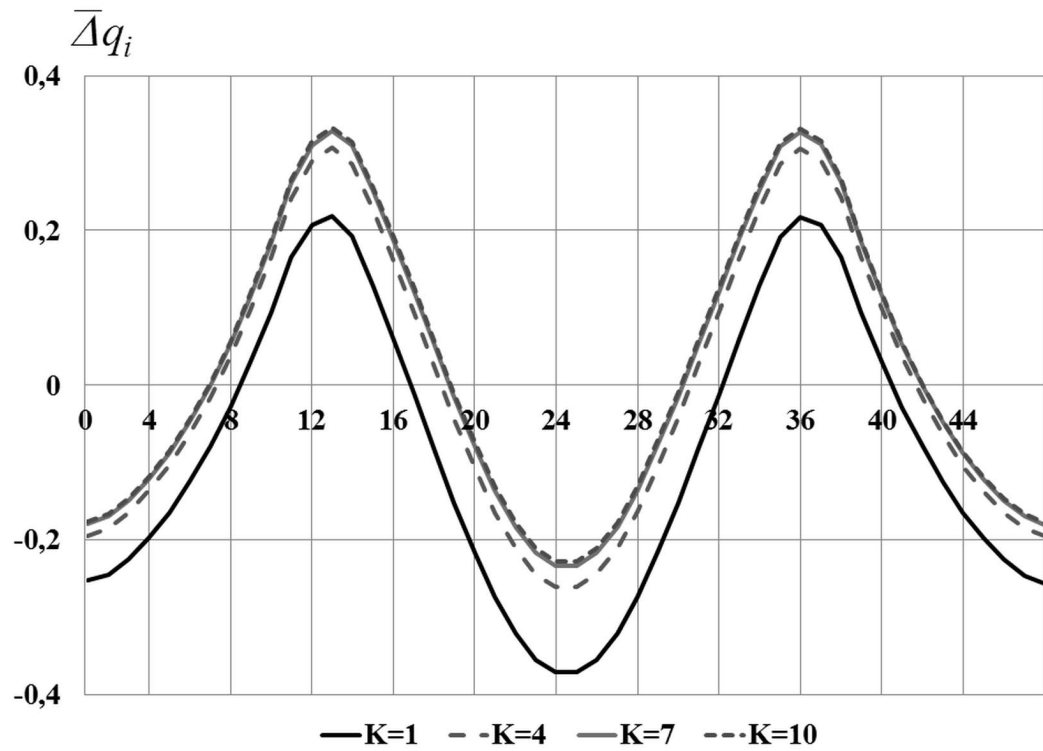
термоэкранов; 2) с использованием ламповых модулей; 3) совместное использование термоэкранов и ламповых модулей.

Предполагалось, что испытуемый объект, описанный в разделе 2.4.2, располагается симметрично относительно цилиндрической поверхности, частями которой являются поверхности боковых экранов.

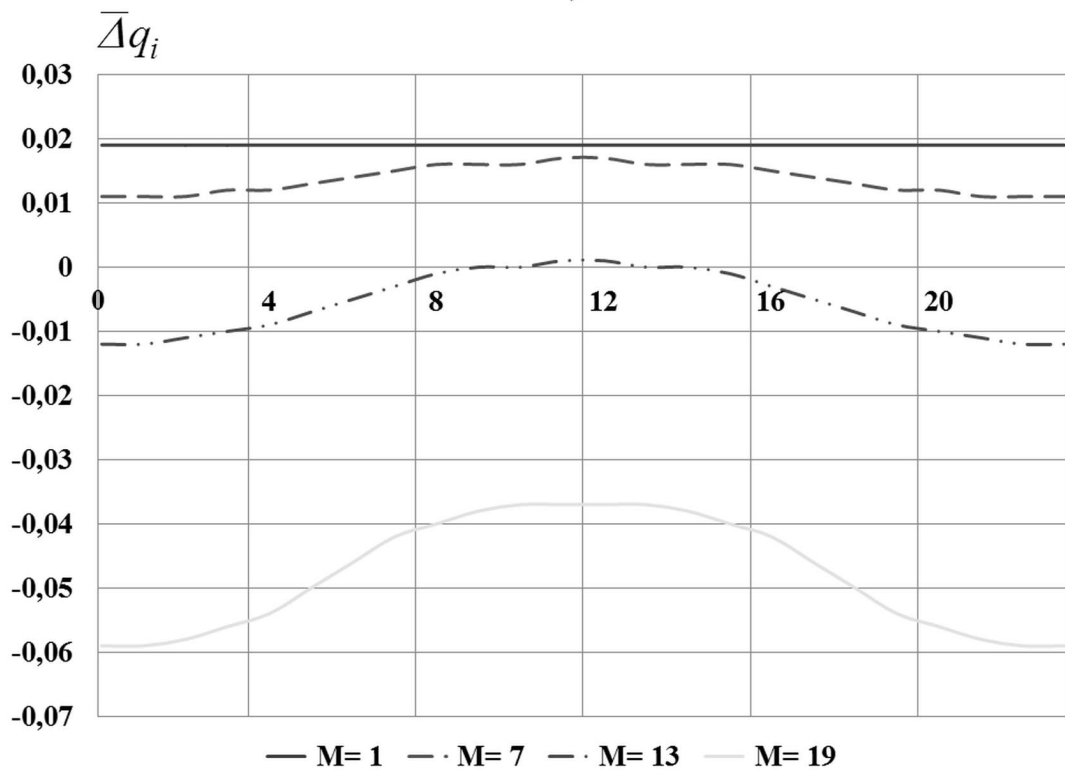
В качестве моделируемых тепловых нагрузок рассматривались нагрузки, соответствующие нахождению объекта над поверхностью Земли на высоте 300 км в подсолнечной точке (зенитный угол Солнца равен 0^0). Продольная ось oz объекта параллельна поверхности Земли, а ось ox направлена к центру Земли. При этом ось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

Расчет плотности падающих на элементы испытуемого объекта тепловых потоков от Солнца и Земли осуществлялся по известной методике [2].

Результаты расчетов локальных безразмерных относительных погрешностей $\Delta \bar{q}_i$ для трех сопоставляемых способов моделирования тепловых нагрузок представлены на графиках рисунков 2.13 -2.15.



a)



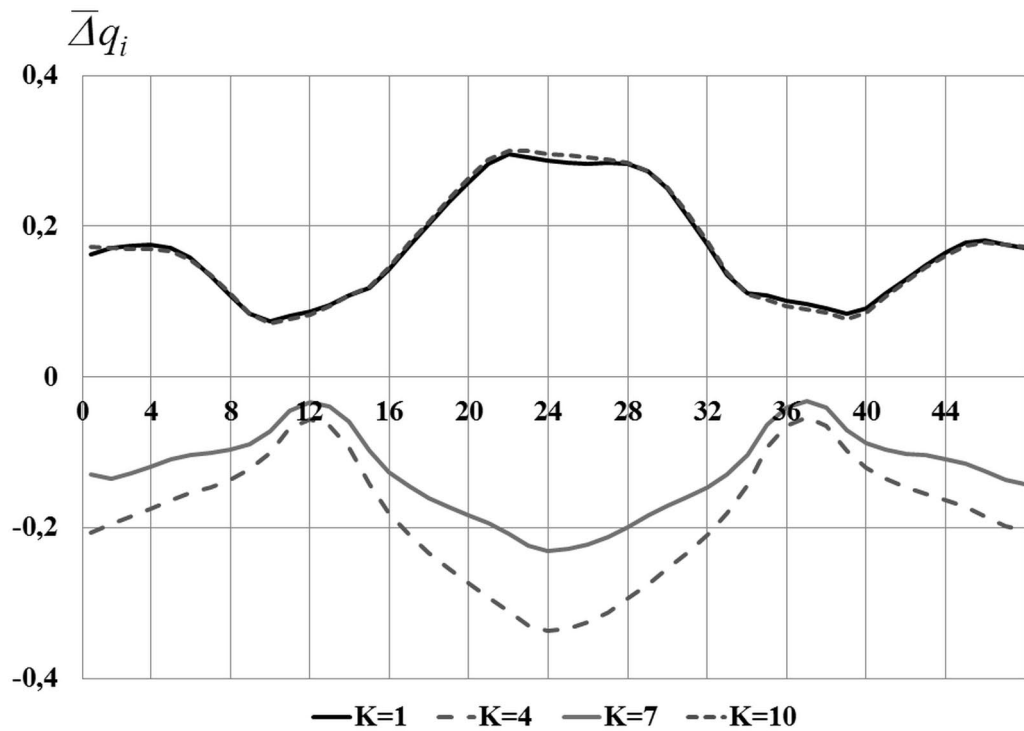
б)

Рисунок 2.13 - Безразмерные погрешности моделирования расчетных тепловых нагрузок в точках поверхности цилиндрического объекта в термобарокамере с термозэкранами. Точки расположены в определенных поясах сечений поверхности, а – боковая поверхность, б – торцевая поверхность

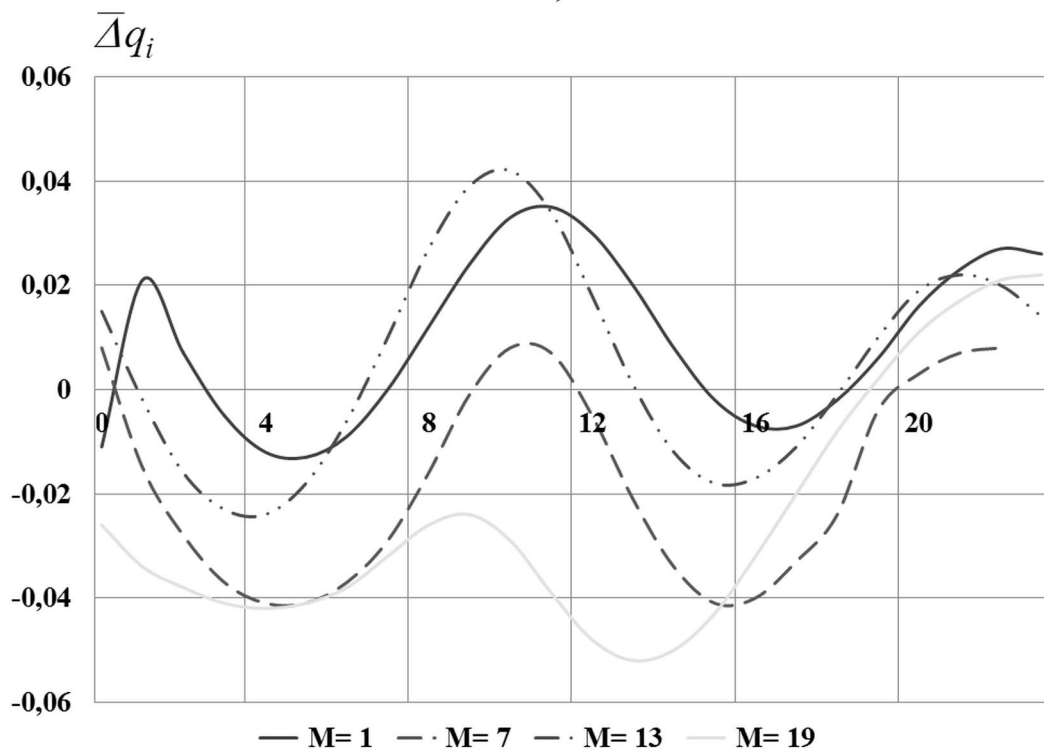
На этих графиках погрешности приводятся не для всех тепловоспринимающих элементов (количество их чрезвычайно велико), а для нескольких совокупностей элементов испытуемого объекта, сгруппированных следующим способом: элементы боковой (цилиндрической) поверхности сгруппированы по поясам, которые образованы соседними поперечными сечениями, а группы элементов торцевых поверхностей образованы соседними окружностями, с помощью которых торцевая поверхность (круг) делится на отдельные элементы. Для элементов боковой поверхности объекта приводятся погрешности содержащиеся в поясах $K = \{1;4;10\}$, а для элементов торцевых поверхностей - в поясах $M = \{1;7;13;19\}$. Для боковой поверхности погрешности приводятся лишь для половины поясов, поскольку в силу особенности ориентации испытуемого объекта относительно источников внешних тепловых потоков, а также из-за симметричного расположения объекта относительно излучающих элементов имитатора имеет место симметрия в характере распределения погрешностей моделирования относительно центральной секущей плоскости имитатора.

На рисунке 2.13 представлены графики зависимости $\Delta\bar{q}_i$ от положения тепловоспринимающего элемента в поясах с номером K и M для имитатора с термоэкранами.

На рисунке 2.14 представлены аналогичные графики для имитатора на основе галогенных ламп накаливания. Результаты решения рассматриваемой задачи получены с использованием методического подхода к расчету угловых коэффициентов, разработанным автором данной диссертации.



a)



б)

Рисунок 2.14 - Безразмерные погрешности моделирования расчетных тепловых нагрузок в точках поверхности цилиндрического объекта в ламповом имитаторе. Точки расположены в определенных поясах сечений поверхности, а – боковая поверхность, б – торцевая поверхность

На рисунке 2.15. приведены результаты расчета заданных внешних тепловых нагрузок с помощью имитатора, включающего в себя термоэкраны и систему ламп накаливания.

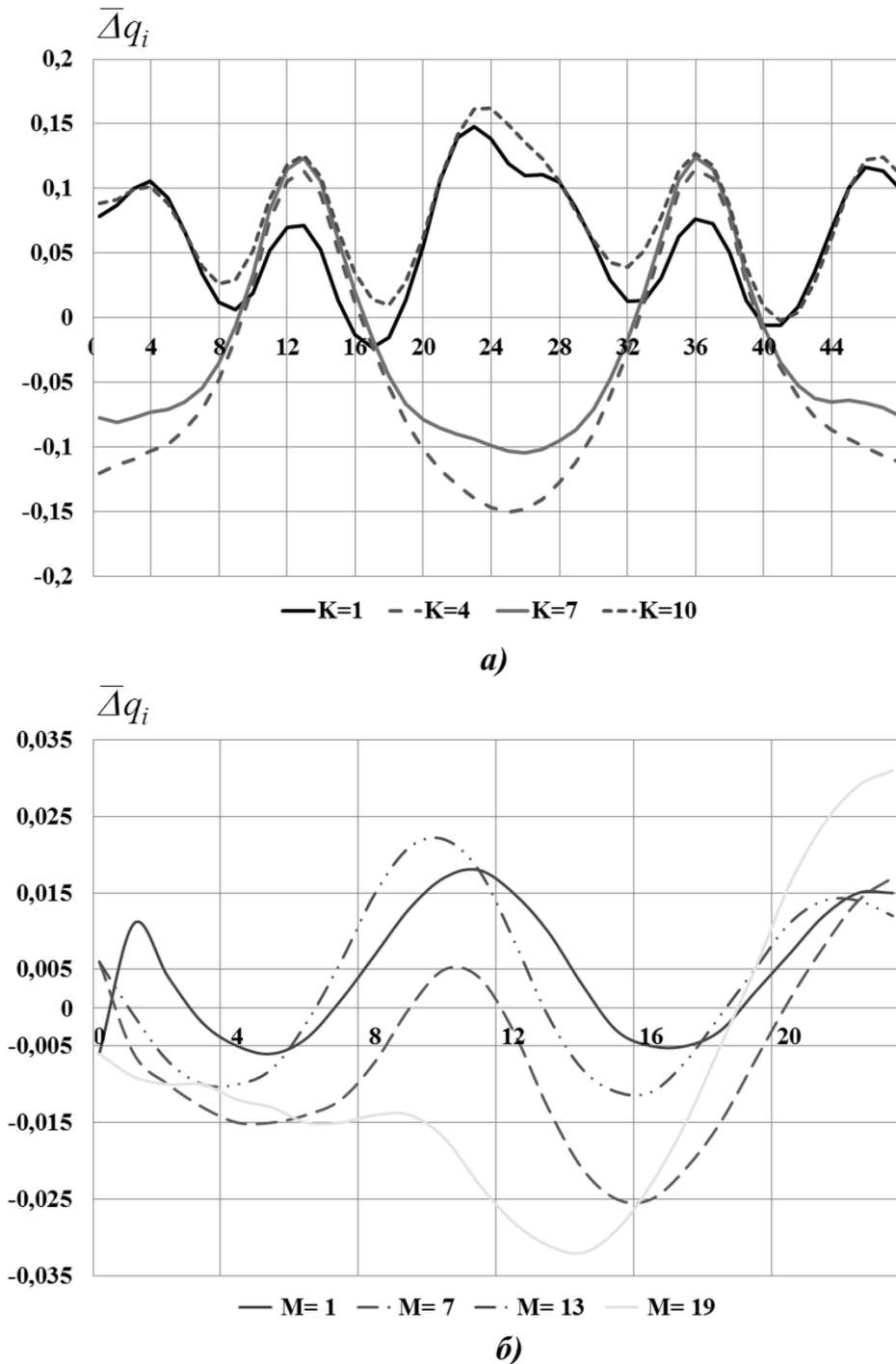


Рисунок 2.15 - Безразмерные погрешности моделирования расчетных тепловых нагрузок в точках поверхности цилиндрического объекта в термобарокамере, оснащенной термоэкранами и системой галогенных ламп накаливания. Точки расположены в определенных поясах сечений поверхности, а – боковая поверхность, б – торцевая поверхность

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

На каждом рисунке ниже графиков приводятся результаты расчетов среднеинтегральных ($\Delta\bar{q}_{инт}$) и среднеквадратичных ($\Delta q_{квдр}$) погрешностей.

Для каждого способа моделирования тепловых нагрузок также приводятся результаты расчетов среднеинтегральных ($\Delta\bar{q}_{инт}$) и среднеквадратичных ($\Delta\bar{q}_{квдр}$) погрешностей соответственно:

$$1 - \Delta\bar{q}_{инт} \approx 0, \Delta\bar{q}_{квдр} = 0,1312;$$

$$2 - \Delta\bar{q}_{инт} = -0,02 \quad \Delta\bar{q}_{квдр} = 0,1149;$$

$$3 - \Delta\bar{q}_{инт} = 0,0001 \quad \Delta\bar{q}_{квдр} = 0,0572.$$

Таким образом, разработанная методика моделирования внешних тепловых нагрузок на космический аппарат в термобарокамерах, оснащенных 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.

2.5 Обсуждение перспектив развития имитационных средств на основе сетчатых излучателей

Исследованию методического подхода, разработке алгоритма и апробации решения задачи выбора оптимального режима работы имитатора на основе сетчатых нагревателей уделяется большое внимание в работах [35,41]. В данном разделе диссертации ограничимся лишь краткой характеристикой наиболее существенных моментов уже имеющегося решения и отметим направления дальнейшего развития имитационных средств основанных на использовании принципа подвода энергии, реализованного в сетчатых нагревателях.

Как отмечалось в разделе 1.3.5 сетчатые излучатели имитатора устанавливаются в непосредственной близости от тех участков поверхности испытываемого объекта, на которые они должны воспроизводить расчетные внешние тепловые нагрузки.

Используемые сетчатые нагреватели, выполненный в виде параллельно расположенных m токопроводящих проводов с диаметром d и длиной l должны воспроизводить заданные тепловые нагрузки на некоторую поверхность испытываемого объекта. Обычно на этой поверхности выбирается какое-то число N тепловоспринимающих элементов, задаются координаты их центральных точек, ориентация и значения плотности q_i^0 подводимых к ним тепловых потоков ($i = 1, 2, \dots, N$). Для минимизации среднеквадратичной погрешности воспроизведения вектора $q^0 = (q_i^0, i = 1, 2, \dots, N)$ вводится в рассмотрение целевая функция ψ , являющейся функцией подводимой к нагревателю электрической мощности W .

$$\psi(W) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{W \cdot \varphi_{di-\text{нагр}i}}{\pi \cdot d \cdot l \cdot m} - q_i^0 \right)^2, \text{ где } \varphi_{di-\text{нагр}} - \text{ локальный угловой коэффициент}$$

i – го тепловоспринимающего элемента и излучателя.

Функция $\psi(W)$ будет иметь минимум в точке, обращающей производную

$$\frac{d\psi}{dW} \text{ в ноль } \left(\frac{d\psi}{dW} = 0 \right). \text{ То есть при } W = \frac{\sum_{i=1}^N \pi \cdot q_i^0 \cdot d \cdot l \cdot m \cdot \varphi_{di-\text{нагр}}}{\sum_{i=1}^N \varphi_{di-\text{нагр}}}.$$

Такое значение W обеспечивает минимальное значение среднеквадратичной погрешности воспроизведения заданных внешних тепловых нагрузок $q_i^0 (1, 2, \dots, N)$ и будет считаться оптимальным значением величины W .

Что касается локального углового коэффициента i – го тепловоспринимающего элемента и излучателя ($\varphi_{di-\text{нагр}}$), то его можно определить одним из двух известных методов: 1) Методом, основанным на аппроксимации элементов поверхности излучающей нити поверхностью многогранника. 2) Методом, основанном на замене цилиндрического элемента

излучателя плоским элементом с ориентацией, зависящей от положения тепловоспринимающего элемента и элемента излучающей нити.

Однако необходимо отметить то важное обстоятельство, что в известных решениях рассматривается задача выбора оптимального режима только одного сетчатого излучателя, призванного обеспечить максимально возможную точность моделирования расчетных значений локальных или средних по поверхности испытуемого объекта внешних тепловых потоков. Это ограничение обусловлено тем, что известные решения основываются на введении для сетчатого излучателя прямоугольной пространственной системы координат, связанной с 1-ой излучающей нитью нагревателя и осью ox , направленной вдоль центральной оси нити. При этом ось oz , лежит в плоскости нагревателя, а ось oy образует с осями ox и oz правую систему координат. Начало координат совмещается с центральной точкой торца 1-ой нити. Геометрическая модель испытуемого объекта задается именно в этой системе координат. Однако актуальной является задача создания имитатора, состоящего из нескольких автономных сетчатых модулей, каждый из которых может участвовать в облучении различных участков поверхности испытуемого объекта. То есть любой участок облучаемой поверхности может подвергаться воздействию излучения, исходящего от нескольких модулей. Очевидно, что функциональные возможности и область применения такого имитатора будут несравненно шире, чем у имитатора, имеющего в своем составе панели, облучающие строго определенные участки поверхности испытуемого объекта. Режим работы такого имитатора уже не может характеризоваться распределением интенсивности исходящего от модулей излучения, как у обычных имитаторов модульного типа с условно линейчатыми или точечными излучателями. В данном случае оптимизацию режима работы имитатора необходимо осуществлять путем минимизации целевой функции как функции величин электрической мощности, подводимой к сетчатым модулям.

Целесообразным представляется следующий подход к решению задачи управления многомодульным имитатором, содержащем какую-то совокупность

k плоских сетчатых излучателей с различной ориентацией в пространстве и различной площадью поверхности:

1) Вводится в рассмотрение стендовая система координат, связанная с экспериментальной установкой.

2) Задаются геометрические параметры каждой сетчатой панели (модуля): длина нитей, их диаметр, расстояние между соседними нитями, число нитей.

3) В стендовой системе координат задается геометрическая модель испытуемого объекта одним из двух способов, описанных в разделе 2.1.

При этом вводятся следующие обозначения: x_i, y_i, z_i прямоугольные координаты центральных точек выделенных элементов наружной поверхности испытуемого объекта ($i = 1, 2, \dots, N$); m_i, n_i, l_i - направляющие косинусы каждого элемента тепловоспринимающей поверхности.

4) В стендовой системе координат задаются геометрические параметры, касающиеся сетчатых модулей имитатора: $x_{0,j}, y_{0,j}, z_{0,j}$ ($j = 1, 2, \dots, k$) - координаты центральных точек первых нитей каждой из k сеток; m_j, n_j, l_j - направляющие косинусы векторов, совпадающих с осями нитей в j -ом модуле.

5) Расчет локальных угловых коэффициентов тепловоспринимающих элементов испытуемого объекта с каждой сеткой, например с j -ой, должен осуществляться в системе координат, связанной с этой сеткой. Для этого координаты и ориентация каждого тепловоспринимающего элемента испытуемого объекта, первоначально заданные в стендовой системе координат, должны быть представлены в системах координат, связанных с сетчатыми панелями.

6) Составляется целевая функция $\psi(W_j, j = 1, 2, \dots, k)$ как функция k переменных W_j . Значения переменных W_j , при которых функция принимает минимальное значение, и будут определять оптимальный режим работы имитатора.

Очевидно, что решение такой задачи является весьма трудоемким и может служить предметом особого рассмотрения в рамках другой работы.

Выводы по главе:

1) Результаты сравнительного исследования различных известных методов оптимизации энергетических режимов работы имитаторов модульного типа 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, но положение точек минимума целевой функции существенно отличаются. Это свидетельствует об отсутствии единственности решения рассматриваемой задачи.

2) Разработан методический подход и алгоритм решения задачи оптимизации температурных режимов термоэкранов при испытаниях КА в термобарокамерах, не оснащенных специальными имитаторами внешних тепловых нагрузок.

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.

3) Разработана методика моделирования внешних тепловых нагрузок на космический аппарат в термобарокамерах, оснащённых термоэкранами и системой галогенных ламп накаливания, позволяющая определять энергетические режимы совместной работы термоэкранов и системы ламп, что дает возможность значительно повысить точность воспроизведения расчетных тепловых нагрузок.

3 УСОВЕРШЕНСТВОВАННАЯ МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВНЕШНИХ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК НА ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

С начала шестидесятых и почти до конца девяностых годов прошлого столетия в странах, занимающихся разработкой космической техники, создавалось значительное количество тепловакуумных экспериментальных установок, предназначенных для наземных испытаний космических аппаратов с целью отработки их тепловых режимов, проверки работоспособности механических систем при имитации условий космического полета, а также для проведения комплексных электрических испытаний штатных изделий при моделировании режимов перехода давления внешней газовой среды от нормального состояния к состоянию глубокого вакуума. Разрабатывались методы и технические средства экспериментального моделирования условий космического полета. На этой стадии актуальным являлся вопрос о допустимых погрешностях моделирования основных факторов космической среды, оказывающих влияние на тепловое состояние КА [2,3,5]. Погрешности воспроизведения основных тепловых факторов внешней среды, проявляются через погрешности Δq_w в величине плотности q_w теплового потока, подводимого к наружной поверхности испытуемого объекта. Но поскольку величина погрешности (Δq_w) сама по себе не являлась наглядным критерием точности моделирования условий внешнего теплообмена, то нужны были более наглядные критерии. Ими могли служить точность воспроизведения теплового состояния различных характерных элементов испытываемых объектов. В этом случае возникала задача, заключающаяся в переходе от допустимых погрешностей в воспроизведении теплового состояния характерных элементов КА к допустимой погрешности задания величины q и в последующем переходе к допустимой погрешности моделирования того или иного фактора

космического пространства. Именно в таком виде на стадии создания средств имитации воздействия факторов космического полета на тепловое состояние КА и формулировались требования к системам имитации по точности, разумеется, с учетом технических возможностей, а также экономических и организационных факторов. 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 [1,5], 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.

3.1 Методический подход к решению задачи

Воспользуемся широко применяемым в различных областях исследований методом, основанным на анализе с помощью математической модели физического процесса и аппарата разложения функции в ряд Тейлора реакции одной величины на возмущение другой [6]. Конкретно в данном случае метод реализуется следующим образом. Составляется уравнение или система уравнений, характеризующие связь между подводимым к анализируемой поверхности или элементу КА внешним тепловым потоком и параметром,

точность воспроизведения которого анализируется. Этим параметром может быть внутренняя температура, температура поверхности рассматриваемого элемента, величина результирующего локального или интегрального по поверхности теплового потока, мощность системы терморегулирования и т.д. Внешнему тепловому потоку, подводимому к поверхности рассматриваемого элемента или отсека, дается возмущение. Реакцию интересующего нас параметра теплового режима на это возмущение определим с помощью разложения функции в ряд Тейлора, используя для этого разложения уравнения связи.

3.2 Оценка зависимости погрешностей воспроизведения теплового состояния различных характерных элементов космических аппаратов от погрешностей внешнего теплового воздействия

3.2.1 Элемент оболочки с термическим сопротивлением, независимым от температуры

В данном случае речь может идти лишь об элементе металлической оболочки или элементе тепловой защиты, но никак не об элементе оболочки, в состав которой входит ЭВТИ, потому что термическое сопротивление ЭВТИ очень сильно зависит от температуры ее экранов (приблизительно обратно пропорционально кубу средней температуры экранов). Оценки показывают, что удельное термическое сопротивление R элемента рассматриваемой оболочки может находиться при этом в диапазоне $(0;2) \text{ К} \cdot \text{м}^2/\text{Вт}$.

При квазистационарном режиме тепловое состояние элемента оболочки характеризуется следующей системой двух алгебраических уравнений, составленных при наличии предположения об одномерности теплопереноса [4]:

$$\begin{cases} q_w = \varepsilon_w \cdot \sigma \cdot T_w^4 + q_0 \\ q_0 = \frac{T_w - T_0}{R} \end{cases}, \quad (3.1)$$

где q_w - плотность поглощаемого поверхностью оболочки внешнего теплового потока, q_0 - плотность результирующего теплового потока через рассматриваемый элемент оболочки, T_w , T_0 - температуры соответственно наружной и внутренней поверхностей оболочки, ε_w - степень черноты наружной поверхности, σ - постоянная Стефана-Больцмана.

Исключив из системы (3.1) T_w , получим уравнение, связывающее величины q_0 , q_w и T_0 :

$$q_w = q_0 + \varepsilon_w \sigma (T_0 + R q_0)^4. \quad (3.2)$$

Допустим, что величина T_0 при возмущении q_w не изменяется.

Приведем уравнение (3.2) к безразмерному виду, разделив все его члены на характерную мощность $\varepsilon_w \sigma T_0^4$. Если обозначить через \bar{q}_w, \bar{q}_0 и \bar{R} безразмерные величины q_w, q_0 и R , то уравнение (3.2) трансформируется в соотношение $\bar{q}_w = \bar{q}_0 + (1 + \bar{R} \bar{q}_0)^4$,

$$\text{где } \bar{q}_w = q_w / \varepsilon_w \sigma T_0^4, \bar{q}_0 = q_0 / \varepsilon_w \sigma T_0^4, \bar{R} = R \cdot \varepsilon_w \sigma T_0^3.$$

Разложив функцию (3.3) в ряд Тейлора относительно \bar{q}_0 , получим следующее нелинейное соотношение, связывающее $\Delta \bar{q}_0$ и $\Delta \bar{q}_w$:

$$K_4 \cdot \Delta \bar{q}_0^4 + K_3 \cdot \Delta \bar{q}_0^3 + K_2 \cdot \Delta \bar{q}_0^2 + K_1 \cdot \Delta \bar{q}_0 - \Delta \bar{q}_w = 0, \quad (3.4)$$

$$\text{где } K_1 = 1 + 4\bar{R}(1 + \bar{R}\bar{q}_0)^3, K_2 = 6\bar{R}^2(1 + \bar{R}\bar{q}_0)^2, K_3 = 4\bar{R}^3(1 + \bar{R}\bar{q}_0), K_4 = \bar{R}^4.$$

Однако следует заметить, что величина $\Delta \bar{q}_0$ не является наглядной иллюстрацией точности моделирования теплопереноса через элемент оболочки, поскольку абсолютная погрешность этой величины (Δq_0) относится к характерной мощности, которая при значении \bar{R} , существенно отличающемся от 0, может многократно превосходить q_0 . По этой причине целесообразно, как и в работе [4], перейти от погрешностей $\Delta \bar{q}_0$ к погрешностям $\Delta \bar{q}_0^* = \Delta q_0 / |\bar{q}_0 (\bar{q}_w = 0)|$.

При таком переходе коэффициенты K_1, K_2, K_3, K_4 претерпевают изменения и принимают следующие значения:

$$K_1^* = [1 + 4\bar{R}(1 + \bar{R}\bar{q}_0)^3]|\bar{q}_0(0)|, \quad K_2^* = 6\bar{R}^2(1 + \bar{R}\bar{q}_0)^2(\bar{q}_0(0))^2, \quad K_3^* = 4\bar{R}^3(1 + \bar{R}\bar{q}_0)|(\bar{q}_0(0))^3|,$$

$$K_4^* = \bar{R}^4(\bar{q}_0(0))^4.$$

С учетом новых коэффициентов алгебраическое уравнение для определения погрешностей $\Delta\bar{q}_0^*$ внешне принимает вид уравнения (3.4):

$$K_1^*\Delta\bar{q}_0^* + K_2^*(\Delta\bar{q}_0^*)^2 + K_3^*(\Delta\bar{q}_0^*)^3 + K_4^*(\Delta\bar{q}_0^*)^4 - \Delta\bar{q}_w = 0 \quad (3.5)$$

Величину \bar{q}_0 , входящую в выражения для коэффициентов уравнения (3.5) и являющуюся функцией \bar{R} и \bar{q}_w можно определить из уравнения (3.3), которое целесообразно представить в виде явного алгебраического уравнения

$$\bar{R}^4\bar{q}_0^4 + 4\bar{R}^3\bar{q}_0^3 + 6\bar{R}^2\bar{q}_0^2 + (1 + 4\bar{R})\bar{q}_0 + 1 - \bar{q}_w = 0 \quad (3.6)$$

Результаты решения уравнения (3.6) для различных значений \bar{q}_w и \bar{R} (например, $\bar{q}_w \in [0;5]$ и $\bar{R} \in [0;2]$) можно использовать для вычисления коэффициентов $K_1^*, K_2^*, K_3^*, K_4^*$ в нужных конкретных случаях.

Следует заметить, что при $\bar{R} = 0$ все коэффициенты, кроме K_1^* , равны нулю, а $K_1^* = -1$. Результаты расчета коэффициентов $K_1^*, K_2^*, K_3^*, K_4^*$ должны использоваться для расчета величины $\Delta\bar{q}_0^*$ с использованием алгебраического уравнения (3.5). Решать это уравнение можно численно, например, в среде Mathcad.

3.2.2 Элемент оболочки, защищенный идеальной экранно-вакуумной теплоизоляцией

Под идеальной понимается ЭВТИ, в которой отсутствует кондуктивный теплоперенос и теплоперенос за счет теплопроводности газа, заключенному между экранами (остаточного газа и газа, выделяющегося в результате гажения экранов и прокладочного материала). В реальной ЭВТИ в зависимости от условий ее эксплуатации, конструкции пакета, технологии его сборки, способа

установки пакетов на изделие эти три вида теплопереноса в той или иной степени присутствуют.

Рассмотрим ЭВТИ, которая откакумировалась и не является обжатой. Теплоперенос через такую изоляцию осуществляется только за счет лучистого теплообмена между экранами. Допустим, полимерные экраны, образующие пакет ЭВТИ, имеют двустороннее алюминированное покрытие со степенью черноты, равной ε , а наружная облицовочная ткань имеет степень черноты ε_w . Тогда при числе n экранов в пакете для стационарного режима величина q_0 теплопритока или утечек тепла через ЭВТИ определяется следующей системой алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} q_w = q_0 + \varepsilon_w \sigma T_w^4 \\ q_0 = \varepsilon_{\text{прис}} \sigma (T_w^4 - T_1^4) \\ q_0 = \varepsilon_{\text{прис}} \sigma (T_1^4 - T_2^4) \\ \dots\dots\dots \\ q_0 = \varepsilon_{\text{прис}} \sigma (T_{n-1}^4 - T_0^4) \end{cases} \quad (3.7)$$

$$\text{где } \varepsilon_{\text{прис}} = \frac{1}{\frac{2}{\varepsilon} - 1}$$

После исключения из системы (3.7) T_w получим уравнение, связывающее q_w с q_0 и T_0 :

$$q_w = q_0 \left(\frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_{\text{прис}}} (n-1) + 1 \right) + \varepsilon_{\text{прис}} \sigma T_0^4 \quad (3.8)$$

$$\text{при постоянном } T_0 \quad \Delta q_w = \left(\frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_{\text{прис}}} (n-1) + 1 \right) \cdot \Delta q_0 \quad (3.9)$$

$$\text{Если } q_w = 0, \text{ то } q_0(q_w = 0) = \frac{-\varepsilon_w \sigma T_0^4}{\frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_{\text{прис}}} \cdot (n-1) + 1}$$

Разделим и умножим правую часть уравнения (3.9) на $q_0(q_w = 0)$, тогда получим следующее соотношение между погрешностями:

$$\frac{\Delta q_w}{\varepsilon_w \sigma T_0^4} = -\frac{\Delta q_0}{q_0 (q_w = 0)} \text{ или } \Delta \bar{q}_0^* = -\Delta \bar{q}_w^* \quad (3.10)$$

Точно такое же соотношение между этими погрешностями имеет место для случая незащищенной теплоизоляцией оболочки, когда $\bar{R} = 0$. Следовательно, на возмущения внешнего теплового потока идеальная ЭВТИ реагирует так же, как и незащищенная теплоизоляцией оболочка.

3.2.3 Элемент оболочки, защищенный реальной экранно-вакуумной теплоизоляцией

Для данного раздела примем следующие дополнительные обозначения и введем некоторые упрощающие предположения.

Дополнительные обозначения:

q_w - плотность поглощенного внешнего теплового потока, [$\text{вт}/\text{м}^2$];

q_0 - плотность результирующего для элемента пакета ЭВТИ теплового потока;

q_ε, q_λ - соответственно лучистая и кондуктивная составляющие q_0 ;

n - число экранов в пакете;

$T_i (i = 1, 2, \dots, n)$ - температуры экранов в пакете ЭВТИ;

T_w, T_1 - температуры соответственно наружного и внутреннего экранов;

$\varepsilon_w, \varepsilon$ - степени черноты соответственно наружной поверхности пакета ЭВТИ и экранов пакета;

ε_{np} - приведенная степень черноты между экранами;

σ - постоянная Стефана-Больцмана;

δ - толщина пакета;

p - параметр, характеризующий степень обжатия ЭВТИ; принимается равным отношению $q_\varepsilon(q_w = 0)$ к $q_\lambda(q_w = 0)$;

f - параметр, зависящий от числа экранов в пакете, степени черноты наружной поверхности пакета и степени черноты экранов;

Δ – символ погрешности;

T_0 - характерная температура, принимаемая равной внутренней температуре КА.

$\varepsilon_w \cdot \sigma \cdot T_0^4$ - характерная величина, к которой относятся плотности тепловых потоков $q_w, q_0, q_\varepsilon, q_\lambda$.

Упрощающие предположения:

1) Пакет ЭВТИ отвакуумирован 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: лучистым и кондуктивным. То есть $q_0 = q_\varepsilon + q_\lambda$.

4) Температура первого экрана (T_1) принимается равной некоторой характерной температуре, например внутренней температуре КА (T_0).

5) Теплообмен в пакете стационарный.

Примем следующую математическую модель теплопереноса через пакет ЭВТИ:

Лучистую составляющую q_ε результирующего теплового потока определим, рассматривая теплообмен между n экранами, имеющими одинаковую степень черноты ε за исключением последнего, у которого наружная сторона имеет степень черноты ε_w (см. рисунок 3.1).

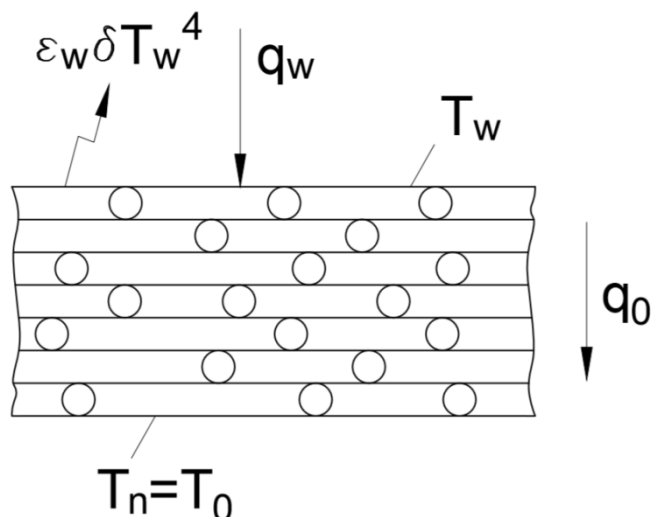


Рисунок 3.1 - Схема теплопередачи через пакет ЭВТИ

Теплообмен между экранами и внешний теплообмен наружного экрана характеризуется известной [1, 2, 5] системой уравнений (3.10).

$$\begin{cases} q_w = \varepsilon_w \cdot \sigma \cdot T_n^4 + q_0 \\ q_\varepsilon = \varepsilon_{np} \cdot \sigma \cdot (T_n^4 - T_{n-1}^4) \\ \dots\dots\dots \\ q_\varepsilon = \varepsilon_{np} \cdot \sigma \cdot (T_2^4 - T_1^4) \end{cases} \quad (3.10)$$

$$\text{, где } \varepsilon_{np} = \frac{1}{\frac{2}{\varepsilon} - 1}.$$

В дальнейшем температуру n -го (последнего) экрана будем обозначать через T_w , чтобы подчеркнуть, что это температура наружной поверхности пакета, а температуру первого экрана отождествим с внутренней температурой КА - с температурой T_0 .

Сложив почленно уравнения системы получим следующее выражение

$$\text{для } q_\varepsilon: \quad q_\varepsilon = \frac{\varepsilon_{np} \cdot \sigma \cdot (T_w^4 - T_0^4)}{n-1}. \quad (3.11)$$

$$\text{Из первого уравнения системы (3.10) следует, что } \sigma \cdot T_w^4 = \frac{q_w - q_\varepsilon}{\varepsilon_w}. \quad (3.12)$$

Рассматривая выражение (3.11) в совокупности с (3.12), после простых преобразований получим следующую зависимость q_ε от $q_w, n, \varepsilon, \varepsilon_w$:

$$q_\varepsilon = \frac{q_w - \varepsilon_w \cdot \sigma \cdot T_0^4}{\frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_{np}}(n-1) + 1} \quad (3.13)$$

В дальнейшем для краткости записей знаменатель выражения (3.13) будем обозначать через $f(n, \varepsilon, \varepsilon_w)$ или даже просто через f , не указывая аргументов.

Определяя выражение для q_λ , будем считать, что кондуктивная проводимость ЭВТИ линейно зависит от температуры [1,4], тогда $q_\lambda = \frac{c}{\delta} (T_w^2 - T_0^2)$. Здесь коэффициент c имеет размерность коэффициента теплопроводности и характеризует кондуктивную тепловую проводимость пакета.

Тогда выражение для плотности результирующего теплового потока q_0 через пакет можно записать в виде:

$$q_0 = \frac{q_w - \varepsilon_w \cdot \sigma \cdot T_0^4}{f(n, \varepsilon, \varepsilon_w)} + \frac{c}{\delta} \cdot (T_w^2 - T_0^2). \quad (3.14)$$

Условимся характеризовать степень обжатия пакета ЭВТИ параметром p , равным отношению q_λ к q_ε при $q_w = 0$. То есть, примем

$$p = \frac{q_\lambda(q_w = 0)}{q_\varepsilon(q_w = 0)}. \quad (3.15)$$

$$\text{При } q_w = 0 \quad q_\varepsilon(q_w = 0) = -\frac{\varepsilon_w \sigma \cdot T_0^4}{f(n, \varepsilon, \varepsilon_w)}, \quad (3.16)$$

$$q_\lambda = p \cdot q_\varepsilon, \quad q_0 = -(1+p) \cdot \frac{\varepsilon_w \cdot \sigma \cdot T_0^4}{f(n, \varepsilon, \varepsilon_w)},$$

$$T_w = \sqrt[4]{-\frac{q_0}{\varepsilon_w \cdot \sigma}} \quad \text{или}$$

$$T_w = T_0 \cdot \sqrt[4]{\frac{1+p}{f(n, \varepsilon, \varepsilon_w)}}, \quad \text{тогда}$$

$$q_\lambda = \frac{c}{\delta} \cdot T_0^2 \cdot \left(\sqrt[4]{\frac{1+p}{f}} - 1 \right). \quad (3.17)$$

Из представленных выше соотношений, (3.15) – (3.17) для p , q_ε и q_λ следует, что

$$p = -\frac{c \cdot f}{\delta \cdot \varepsilon_w \cdot \sigma \cdot T_0^2} \left(\sqrt{\frac{1+p}{f}} - 1 \right). \quad (3.18)$$

Обозначим безразмерное выражение $\frac{c}{\delta \cdot \varepsilon_w \cdot \sigma \cdot T_0^2}$ через \bar{c} , тогда из соотношения (3.18) получим зависимость \bar{c} от p и f :

$$\bar{c} = -\frac{p}{f \cdot \left(\sqrt{1+p/f} - 1 \right)}. \quad (3.19)$$

Если вернуться к соотношению (3.5), разделив обе его части на характерную величину $\varepsilon_w \cdot \sigma \cdot T_0^4$, получим следующее безразмерное выражение для плотности результирующего теплового потока через пакет:

$$\bar{q}_0 = \frac{\bar{q}_w - 1}{f} + \bar{c} \cdot (\bar{T}_w^2 - 1), \quad (3.20)$$

где $\bar{q}_0 = q_0 / \varepsilon_w \cdot \sigma \cdot T_0^4$, $\bar{q}_w = q_w / \varepsilon_w \cdot \sigma \cdot T_0^4$, $\bar{T}_w = T_w / T_0$, $\bar{c} = \frac{c}{\delta \cdot \varepsilon_w \cdot T_0^4}$

Из соотношения (3.19) следует, что безразмерный параметр \bar{c} может быть выражен через параметры p и f .

Поскольку
$$\bar{T}_w = \sqrt{\bar{q}_w - \bar{q}_0}, \quad (3.21)$$

величину \bar{q}_0 можно представить в виде неявной функции \bar{q}_w :

$$\bar{q}_0 - \frac{\bar{q}_w - 1}{f} - \bar{c} \cdot (\sqrt{\bar{q}_w - \bar{q}_0} - 1) = 0 \quad (3.22)$$

Полученное уравнение и будет использоваться для оценки влияния погрешностей задания величины \bar{q}_w на величину \bar{q}_0 .

Реакция величины плотности результирующего теплового потока через пакет ЭВТИ на возмущение внешнего теплового потока

Воспользуемся методическим подходом, кратко уже кратко описанном в разделе 3.1

$$\Delta \bar{q}_0 \approx \frac{d\bar{q}_0}{d\bar{q}_w} \cdot \Delta \bar{q}_w; \quad \frac{d\bar{q}_0}{d\bar{q}_w} = -\frac{\partial F / \partial \bar{q}_w}{\partial F / \partial \bar{q}_0},$$

где $F(\bar{q}_0, \bar{q}_w)$ - левая часть соотношения (3.13).

Определив частные производные функции F по переменным \bar{q}_w и \bar{q}_0 , получим следующее соотношение между погрешностями:

$$\Delta \bar{q}_0 \approx \frac{1 + \frac{\bar{c}}{2\sqrt{\bar{q}_w - \bar{q}_0}}}{1 + \frac{\bar{c}}{2\sqrt{\bar{q}_w - \bar{q}_0}}} \cdot \Delta \bar{q}_w, \quad (3.23)$$

где \bar{c} определяется выражением (3.19).

Коэффициент, связывающий погрешности безразмерных величин \bar{q}_0 и \bar{q}_w , зависит от параметров f , p , независимой переменной \bar{q}_w и зависимой переменной \bar{q}_0 . Зависимость \bar{q}_0 от \bar{q}_w можно выявить, решая итерационным методом систему, в которую входят уравнения (3.20) и (3.21). Но здесь следует отметить одно исключительно важное обстоятельство, касающееся соотношения между погрешностями $\Delta \bar{q}_0$ и $\Delta \bar{q}_w$. Соотношение (3.23) характеризует связь между абсолютными безразмерными погрешностями, которые из-за высоких значений термического сопротивления теплоизоляции могут отличаться в десятки и даже в сотни раз. Вследствие этого соотношение (3.14) не может служить наглядной иллюстрацией степени влияния погрешностей моделирования величины \bar{q}_w на тепловое состояние элементов КА, экранируемых ЭВТИ. Поэтому практический интерес может представлять только соотношение между погрешностью задания внешнего теплового потока и некоторой характерной относительной погрешностью моделирования результирующего теплового потока через пакет ЭВТИ. В качестве этой характерной погрешности целесообразнее всего взять отношение $\Delta \bar{q}_0(\bar{q}_w)$ к величине \bar{q}_0 при $\bar{q}_w = 0$.

Обозначим это отношение через $\bar{\Delta} \bar{q}_0^* = \frac{\Delta \bar{q}_0(\bar{q}_w)}{\bar{q}_0(\bar{q}_w = 0)}$, тогда

$$\bar{\Delta q}_0^* = K \cdot \Delta \bar{q}_w, \quad (3.24)$$

где

$$K = \frac{\frac{1}{f} + \frac{\bar{c}}{2\sqrt{\bar{q}_w - \bar{q}_0}}}{1 + \frac{\bar{c}}{2\sqrt{\bar{q}_w - \bar{q}_0}}} \cdot \frac{1}{\bar{q}_0(\bar{q}_w = 0)}. \quad (3.25)$$

Следует при этом подчеркнуть, что коэффициент \bar{c} зависит от p и f . Эта зависимость определяется соотношением (3.19).

Результаты расчета зависимости коэффициента K от величины \bar{q}_w при различных значениях параметров f и p , характеризующих теплоизоляционные свойства пакета ЭВТИ

Расчеты коэффициента K проводились для диапазона возможных значений $\bar{q}_w \in [0;4]$. Такой диапазон значений \bar{q}_w приблизительно соответствует размерным значениям q_w в пределах от 0 до $1400 \frac{вт}{м^2}$.

Величина параметра p , характеризующего соотношение между кондуктивной и лучистой тепловой проводимостью пакета, изменялась в пределах от 0 до 3. Параметр f , зависящий от числа n экранов, степени черноты ε их поверхности и степени черноты ε_w наружной поверхности пакета, принимался равным трем характерным значениям: 100; 300; 500. Такие значения параметр f принимает при числе экранов приблизительно равном соответственно 10; 30; 50 и при $\varepsilon = 0,1$; $\varepsilon_w = 0,55$.

f=100

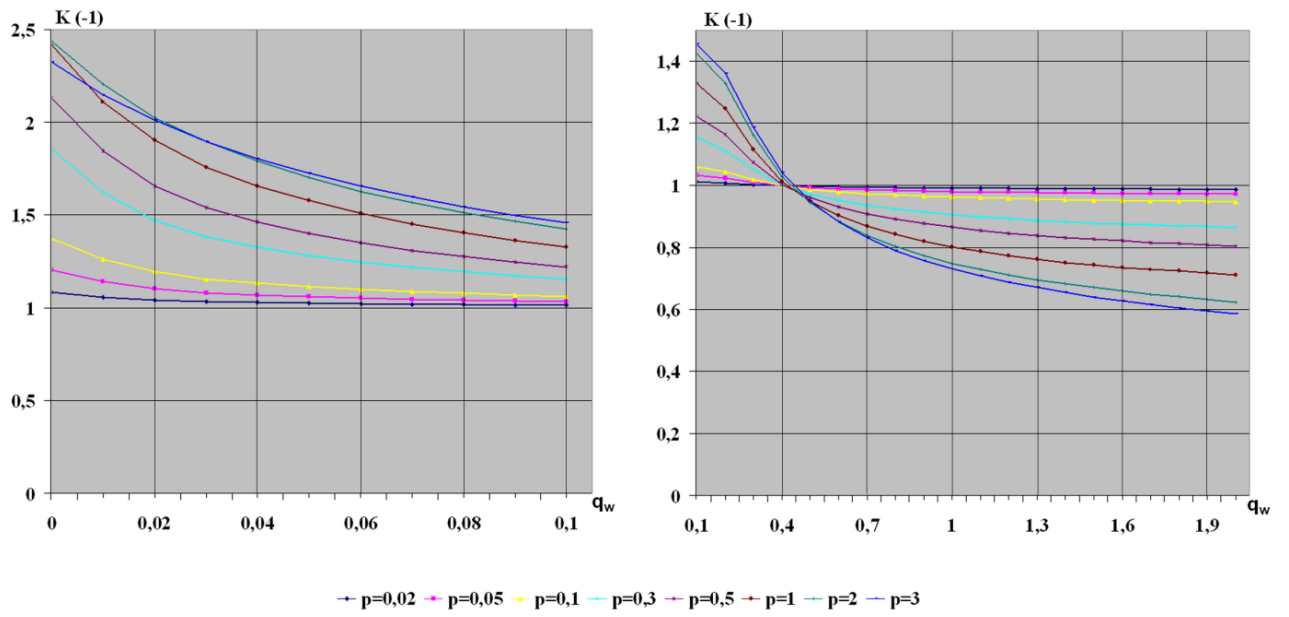


Рисунок 3.2 - Зависимость коэффициента K от \bar{q}_w при $f=100$ и при различных значениях параметра $p \in [0;3]$

f=300

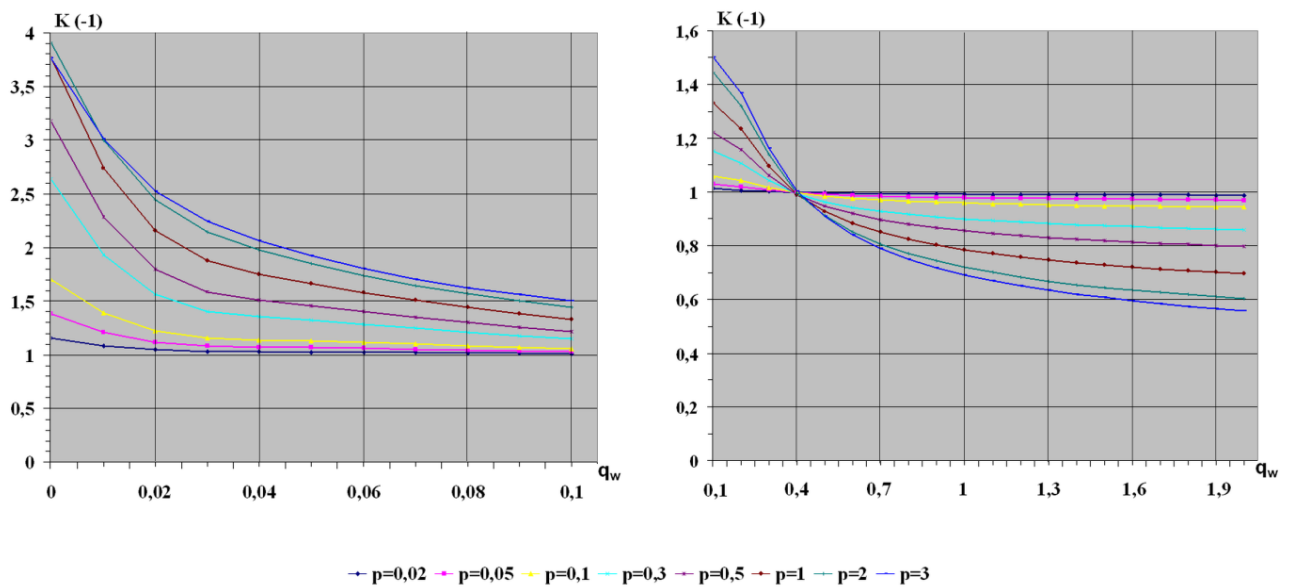


Рисунок 3.3 - Зависимость коэффициента K от \bar{q}_w при $f=300$ и при различных значениях параметра $p \in [0;3]$

f=500

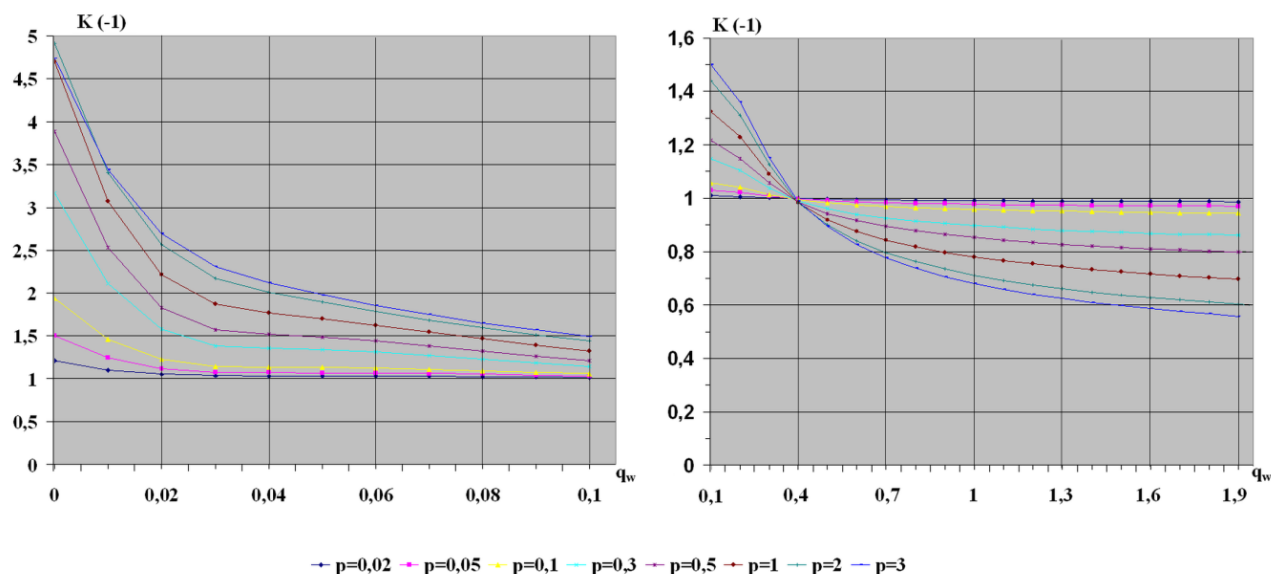


Рисунок 3.4 - Зависимость коэффициента K от \bar{q}_w при $f = 500$ и при различных значениях параметра $p \in [0; 3]$

Результаты расчета представлены на четырех рисунках 3.2- 3.4. Каждый из рисунков соответствует одному из трех значений параметра f ($f = 100; 300; 500$). На каждом рисунке представлена серия графиков зависимости коэффициента K от \bar{q}_w при различных значениях параметра $p \in [0; 3]$. Для придания большей наглядности графикам на рисунках по оси ординат откладывается не величина коэффициента K , а $-K$.

Возникает естественный вопрос о способе использования полученных результатов для оценки реакции величины результирующего теплового потока (величины утечки тепла или теплопритока) через пакет ЭВТИ на погрешность моделирования поглощенного внешнего теплового потока. Продемонстрируем порядок использования полученных результатов на примере.

Допустим, ЭВТИ содержит 30 экранов из полимерной пленки, например, полиэтилентерефталатной с двусторонним напылением алюминия. Пленка формована на сетке и сдублирована со стекловальюю.

Формовка пленки и наличие между экранами стекловалью повышают теплоизоляционные свойства пакета при его обжати (увеличении параметра p). При степени черноты экранов $\varepsilon \leq .1$ и $\varepsilon_w \approx 0.55$ значение параметра $f \geq 300$.

Задавая $\varepsilon_w \approx 0.55$, предполагалось, что пакет ЭВТИ облицован ариmidной желтой тканью (весьма популярной среди отечественных и зарубежных облицовочных тканей для ЭВТИ). Параметр p в основном зависит от плотности n_0 укладки экранов. Считается, что пакет не обжат, если $n_0 \leq 13/\text{см}$. Будем считать, что плотность укладки может превышать отмеченное значение n_0 в два раза. Исходя из этого, можно воспользоваться для оценки коэффициента K рисунками 3.2 - 3.4, принимая во внимание значения K в полосе, образованной графиками, соответствующими величинам параметра $p = 0$ и $p = 2$.

Предположим, внешней поверхностью пакета ЭВТИ поглощается тепловой поток $q_w = 500 \text{ вт}/\text{м}^2$. Тогда при $T_0 = 293\text{K}$, $\varepsilon_w = 0,55$ $\bar{q}_w = 2,18$.

В этом случае $K \in [-1; -0,58]$, а соотношение между погрешностями будет характеризоваться следующим неравенством: $|\bar{\Delta q}_0| \leq |\Delta \bar{q}_w|$.

Если, допустим, поверхность пакета ЭВТИ подвергается в условиях тепловакуумной установки воздействию потока фонового излучения плотностью $q_w = 10 \text{ вт}/\text{м}^2$, что соответствует значению $\bar{q}_w = 0,04$, то в этом случае $K \in [-1,98; -1]$. Соотношение между погрешностями будет характеризоваться неравенством: $|\bar{\Delta q}_0| \leq 2 \cdot |\Delta \bar{q}_w|$.

3.2.4 Отсек, защищенный экранно-вакуумной теплоизоляцией

Если отсек имеет СТР, то погрешности теплопритока или стока тепла через теплоизоляцию прямо выливаются в погрешности мощности активной системы терморегулирования, а если такой системы нет, то в погрешность внутренней температуры.

При стационарном режиме теплоперенос через элемент оболочки, защищенной ЭВТИ, характеризуется уравнением

$$q_0 = \frac{q_w - \varepsilon_w \sigma T_0^4}{\left(\frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_{\text{прис}}}(n-1) + 1\right)}. \quad (3.26)$$

$$\text{При } \Delta T_0 = 0 \quad \Delta q_0 = \frac{\Delta q_w}{\left(\frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_{\text{прис}}}(n-1) + 1\right)}$$

Если теплоизоляция однородна, то

$$\int_F \Delta q_0 dF = \frac{\int_F \Delta q_w dF}{\left(\frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_{\text{прис}}}(n-1) + 1\right)} \quad (3.27)$$

$$\int_F q_0 dF = \frac{\int_F q_w dF - \varepsilon_{\text{прис}} \sigma T_0^4 F}{\left(\frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_{\text{прис}}}(n-1) + 1\right)} \quad (3.28)$$

Разделив почленно (3.27) на (3.28), получим следующее выражение для погрешности мощности СТР:

$$\Delta \bar{Q}_{\text{стр}} = \frac{\int_F \Delta q_w dF}{\int_F q_w dF - \varepsilon_{\text{прис}} \sigma T_0^4 F}.$$

Если принять во внимание то, что величина $\varepsilon_{\text{прис}}$ не превышает 0,04 при степени черноты экрана равном 0,07, то выражение для $\Delta \bar{Q}_{\text{СТР}}$ можно упростить без заметного ущерба для точности:

$$\Delta \bar{Q}_{\text{стр}} \approx \frac{\int_F \Delta q_w dF}{\int_F q_w dF}, \text{ то есть}$$

$$\Delta \bar{Q}_{\text{СТР}} \approx \Delta \bar{Q}_w.$$

3.2.5 Нетеплоизолированный отсек, оснащенный системой терморегулирования

Внутренние тепловыделения N в отсеке и СТР призваны обеспечивать поддержание в отсеке постоянной температуры T_0 при возможных изменениях внешних тепловых нагрузок.

Уравнение теплового баланса для отсека в целом будет иметь вид:

$$Q_w - F\varepsilon_w\sigma T_0^4 + N = Q_{СТР}, \quad (3.29)$$

где $Q_w = \int_F q_w(F)dF$, $Q_{СТР}$ - хладо (тепло) производительность СТР.

Поскольку T_0 не изменяется при возмущении Q_w , то

$$\Delta Q_{СТР} = \Delta Q_w. \quad (3.30)$$

Разделив обе части равенства (3.30) на (3.29) получим:

$$\frac{\Delta Q_{СТР}}{(1 + F\varepsilon_w\sigma T_0^4 - N)} = \frac{\Delta \bar{Q}_w}{1}.$$

На практике чаще всего $F\varepsilon_w\sigma T_0^4 - N = 0$ в этом случае связь между $\Delta \bar{Q}_{СТР}$ и $\Delta \bar{Q}_w$ с помощью коэффициента, равного 1.

3.3 Иллюстрация применения методики на примере оценки теплового влияния исходящего от экранов вакуумной камеры потока фонового излучения на радиационные теплообменники и экранно-вакуумную теплоизоляцию

Используя представленную в данной главе методику, оценим влияние фонового излучения термоэкранов тепловакуумной установки на два характерных и важных элемента системы обеспечения теплового режима КА - радиационный теплообменник и ЭВТИ. Рассмотрим две тепловакуумные установки, одна из которых оснащена криогенными экранами, запитываемыми жидким или кипящим азотом, а другая - оснащена термоэкранами

(термочехлами), минимальная температура на поверхности которых составляет -150°C то есть (123°K).

Очевидно, что наибольшее возмущающее воздействие поток излучения, исходящий от экранов, будет оказывать на те элементы КА, которые в натуральных условиях не подвержены воздействию излучения Солнца и планет, то есть на те элементы, для которых номинальное значение плотности внешнего теплового потока практически равна 0 ($q_w = 0$).

Рассматривая случай с криогенными экранами, необходимо отметить одно важное обстоятельство, заключающееся в том, что эффективная температура этих экранов будет выше температуры кипящего азота, поскольку конструктивно экраны выполняются в виде различного рода криорешеток, теплопроводность материала которых хотя и значительна, но все же ограничена. Тепловые потоки, исходящие от испытуемого объекта и средств имитации источников внешних тепловых нагрузок, поглощаясь элементами поверхности ребрения экранов, могут значительно повышать их температуру. Кроме того, элементы поверхности экранов частично отражают падающий на них извне поток излучения, что еще больше повышает плотность уходящего в направлении испытуемого объекта излучения, называемое фоновым.

Практика эксплуатации тепловакуумной установки ВК600/300 свидетельствует о том, что плотность потока фонового излучения, приходящего в область размещения испытуемого объекта при работающем имитаторе солнечного излучения может достигать величины порядка $10 \text{ вт}/\text{м}^2$.

Допустим, радиационная поверхность находится на теневой стороне КА, а за счет подвода к ней внутренних тепловыделений из КА на этой поверхности реализуется температура на уровне $T_0 = 283 \text{ K}$.

При $\varepsilon_w = 0,92$ и при плотности потока фонового излучения $10 \text{ вт}/\text{м}^2$
 $(\Delta q_w = 10 \text{ вт}/\text{м}^2) = 0,035$. $\bar{\Delta}q_w^* = \frac{\Delta q_w}{\varepsilon_w \sigma T_0^4} = 0,035$ Согласно (3.10) $\Delta \bar{q}_0^* = -\bar{\Delta}q_w$,

$$\text{где } \Delta \bar{q}_0^* = \frac{\Delta q_0}{q_0(q_w = 0)}.$$

Рассмотрим влияние фонового излучения, исходящего от криогенных экранов камеры, на теплоперенос через ЭВТИ. Допустим степень обжатия матов ЭВТИ не превышает 2, то есть $p \leq 2$, а число экранов в пакете не превышает 30. Согласно графикам на рисунке 3.3 при $p \in [0;2]$ $K \in [1;3.7]$. Тогда при $\bar{\Delta} q_w^* = \frac{\Delta q_w}{\varepsilon_w \sigma T_0^4} = 0,035$. $\Delta q_o' \in [-0,035; -0,12]$.

Ниже приводятся аналогичные оценки для случая термобарокамеры с термочехлами. Температуру термочехлов примем равной -150^0C т.е. $123K$, а $\varepsilon_w = 0,92$. В этом случае $\Delta q_w = 12 \frac{вт}{м^2}$, а $\Delta q_w' = 0,036$.

Тогда для радиационной поверхности $\Delta q_o^o = -0,036$, а для рассматриваемого пакета ЭВТИ $\Delta q_o' \in [-0,036; -0,13]$.

Результаты выполненных оценок свидетельствуют о том, что в термобарокамерах с термочехлами и в тепловакуумных установках с криогенными экранами уровни потоков фонового излучения соизмеримы.

Выводы по главе:

1. Усовершенствованная и представленная в данной главе 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.

2. Проведены оценки зависимости погрешностей воспроизведения теплового состояния различных характерных элементов КА от погрешностей моделирования внешнего теплового воздействия.

3. Для реальной экранно-вакуумной теплоизоляции при различных значениях плотности поглощаемого внешнего теплового потока выявлена связь между погрешностями моделирования этого потока и погрешностями в

величине результирующего теплового потока через пакеты теплоизоляции с различным числом экранов и при различной степени обжатия пакета, характеризуемой величиной отношения кондуктивной и лучистой составляющих результирующего потока.

4. Установлено, что в термобарокамерах с термочехлами и в тепловакуумных установках с криогенными экранами уровни потоков фонового излучения соизмеримы.

5. Продемонстрирован способ использования полученных результатов для определения погрешностей моделирования теплопереноса через ЭВТИ в конкретных случаях.

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. Проанализировав способы моделирования в экспериментальной установке нестационарных во времени и в пространстве лучистых полей, формируемых одновременно и Солнцем и планетой, 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 трубчатыми 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. Разработанная 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. Усовершенствованная 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 термозэкранами 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 изучений взаимного теплового влияния термозэкранов и системы галогенных ламп накаливания на формирование температурного поля термозэкранов и поля лучистого потока в рабочем объеме экспериментальной установки.

Список сокращений и условных обозначений

В диссертации используются следующие сокращения и условные обозначения:

КА – космический аппарат

ИО – испытуемый объект

ВНИИЭМ – Всероссийский научно-исследовательский институт
электромеханики

ВК – вакуумная камера

ЭВТИ – экранно-вакуумная теплоизоляция

СТР – система терморегулирования

ГЛН – галогенные лампы накаливания

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алифанов О.М. Обратные задачи теплообмена. –М.: Машиностроение, 1988. – 280 с.
2. Алифанов О.М., Артюхин Е.А., Румянцев С.В. Экстремальные методы решения некорректных задач. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 288с.
3. Алифанов О.М., Артюхин Е.А., Румянцев С.В. Решениеб граничных и коэффициентных обратных задач теплопроводности итерационными методами. // Теплообмен – VI. – Минск: ИТМО АН БССРб, 1980 – Т. 9. – С. 106-112.
4. Алифанов О.М. О методах решения некорректных обратных задач. // ИФЖ. – 1983. – Т.45, № 5. – С.742-752.
5. Артюхин Е. А., Румянцев С. В. Градиентный метод нахождения гладких решений граничных обратных задач теплопроводности. Доклад на 9-х Гагаринских чтениях, 1979 г.
6. Авдудевский В.С., Галицейский Б.М. и др. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике. / Под ред. В.К. Кошкина. – М.: Машиностроение, 1975. – 623 с.
7. Андрейчук О.Б., Малахов Н.Н. Тепловые испытания космических аппаратов.- М.: Машиностроение, 1982,-143с.
8. Андреев В.В., Артамонов В.В., Атаманов И.Т. и др. Автоматические планетные станции.- М.: Наука,1973.-280с.
9. Блох А.Г. Основы теплообмена излучением. -М.: Госэнергоиздат, 1962, -331 с.
10. Бронштейн И.Н.,Семендяев К.А.Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов.-13-е издание, исправленное.-М.:Наука . 1986.-544с.
11. Бурдаков В.П., Зигель Ф.Ю. Физические основы космонавтики.- М.: Атомиздат,1975, -232 с.

12. Вакуумная техника: Справочник. /Фролов Е. С., Минайчев В.Е. и др. / Под общей ред. Е.С. Фролова, В.Е. Минайчева. –М.: Машиностроение, 1975,- 360 с.
13. Вакуумная техника: Справочник /Фролов Е.С., Минайчев В.Е., Александрова А.Т. и др., под общей редакцией Е.С.Фролова, В.Е.Минайчева. - М.: Машиностроение, 1985. -360 с.
14. Васильев Ф.П. Методы решения экстремальных задач. –М.: Наука, 1981ю- 400с.
15. Васильев Ф. П. Численные методы экстремальных задач. – М.: Наука, 1980.-520 с.
16. Вопросы глубокого охлаждения. / Пер. С англ.; под ред. М.П. Малкова, М.: ИЛ, 1961. -203 с.
17. Залетаев В.М. Собственное излучения Земли на частично экранируемые от нее элементы космических аппаратов. – “Космические исследования”, 1970, т. VIII, вып. 4, с.636 – 639.
18. Залетаев В.М., Капинос Ю.В., Сургучев О.В. Расчет теплообмена космического аппарата.- М.:Машиностроение, 1979, с.46-78.
19. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением. / Пер. с англ. Под ред. Б.А.Хрусталева. – М.: Мир, 1975. – 234 с.
20. Иванов А.П. Электрические источники света. М. Госэнергоиздат, 1955г.
21. Излучательные свойства твердых тел: Справочник /Под общ. ред. А.Б.Шейндлина. -М.: Энергия, 1974. -472 с.
22. Каданер Я.С. Тепловая изоляция в технике низких температур. / Пер. С англ. – М.: ИЛ, 1958. -190 с.
23. Клибанов М.В. Единственность решений “в целом” некоторых многомерных обратных задач. // Неклассические проблемы математической физики. – Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1981. – С. 101-114.
24. Ключников А.Д., Иванцов Г.П. Теплопередача излучением в огнетехнических установках. М., “Энергия”, 1970. -400 с.

25. Кобранов Г.П., Цветков А.П., Белов А.И., Сухнев В.А. Внешний теплообмен космических аппаратов. -М.: Машиностроение, 1977. -104 с.

26. Козлов Л.В. Моделирование солнечного излучения.//В кн.: Проблемы механики и теплообмена в космической технике. /Сб.ст. под ред. акад. О.М.Белоцерковского. -М.: Машиностроение, 1982, с. 249-264.

27. Козлов Л. В., Нусинов М.Д. и др. Моделирование тепловых режимов космического аппарата и окружающей его среды. Под ред. акад. Г.И.Петрова. М. “Машиностроение”, 1971, 380 С.

28. Кондратьев К.Я. и др. Поле излучения Земли как планеты. Л., Гидрометеиздат, 1967.

29. Круз П., Магнолин Л. Основы инфракрасной техники. Пер. с англ. Воениздат 1964.

30. Колесников А.В. К вопросу о воспроизведении в экспериментальных установках модели спектра теплового излучения планет. //ИФЖ, Минск, 1986, т.50, №2, с. 324-329.

31. Колесников А.В. Методика расчета интенсивности излучения линейчатых излучателей имитаторов внешних тепловых потоков. //ИФЖ, Минск, 1983, т.45, №1, с. 152-153. Деп. в ВИНТИ №1072-83.

32. Колесников А.В. Погрешности имитации поля теплового излучения планет // ИФЖ. - Минск, 1980. - том 39, №2. - 0,356-357. -Деп. в ВИНТИ, 1040-80.

33. Колесников А.В. Приближенное моделирование теплового воздействия планет на космические аппараты. //В тематич. сб.науч.тр.: Проектирование теплонагруженных конструкций.-М.: Изд-во МАИ, 1989, с. 6-16.

34. Колесников А.В., Сербин В.И. Моделирование условий внешнего теплообмена космических аппаратов. -М.:”Информация –XXI век”,1997,- 170с.

35. Колесников А.В., Палешкин А.В. Численный метод выбора энергетического режима работы сетчатого нагревателя. Труды МАИ, 2010, №19.

36. Колесников А.В., Палешкин А.В. Численный метод моделирования внешнего теплообмена космического аппарата с произвольной формой наружных поверхностей. // Вестник МАИ, 2010, №17, т.4.

37. Колесников А.В., Палешкин А.В. Оптимизация энергетического режима работы имитатора внешних тепловых нагрузок// Труды МАИ. 2010, №37.

38. Колесников А.В., Палешкин А.В. Моделирование условий эксплуатации космических аппаратов в наземных экспериментальных установках: Учеб. Пособие. – М.: Изд-во МАИ, 2013.

39. Колесников А.В., Палешкин А.В. Тепловое проектирование космических аппаратов: Учеб. Пособие. – М.: Изд-во МАИ, 2013.

40. Колесников А.В., Мамедова К.И, Палешкин А.В. Градиентные методы оптимизации режима работы имитатора внешних тепловых нагрузок.// Тепловые процессы в технике, 2014, Т.6. №11. с.522 – 528.

41. Колесников А.В., Мамедова К.И, Палешкин А.В. Методика выбора оптимального энергетического режима работы сетчатого нагревателя. // Тепловые процессы в технике, 2015. Т.7, №1. с.37-42.

42. Колесников А.В., Мамедова К.И, Палешкин А.В. Методика оценки влияния погрешностей моделирования внешних тепловых нагрузок на тепловое состояние КА. // Тепловые процессы в технике, 2015. Т.7, №9. с. 417-422.

43. Колесников А.В., Палешкин А.В. Оптимизация энергетического режима работы имитатора внешних тепловых нагрузок. // Электронный журнал “Труды МАИ”, 2010 г. №37.

44. Крянев А.В. Итерационный метод решения некорректных задач. // ЖВМ и МФ. – 1974. – Т.14, №1.-С. 25-35.

45. Космонавтика: Энциклопедия / гл. ред. В.П.Глушко; Редколлегия: В.П.Бармин, К.Д.Бушуев и др. –М.: Сов. Энциклопедия, 1985. -528 с.

46. Малоземов В.В. Тепловой режим космических аппаратов. – М.: Машиностроение, 1980.- 232

47. Мамедова К.И. Палешкин А.В. Моделирование расчетных внешних тепловых нагрузок к поверхности космического аппарата с помощью инфракрасных нагревателей. Статья. Вестник МАИ. 2016, №12, Т.85.

48. Мишин В.П., Алифанов О.М. Обратные задачи теплообмена - области применения при проектировании и испытаниях технических объектов. //ИФЖ.- 1982. – Т.42, №2.- С. 181-192.

49. Моделирование и отработка тепловых режимов летательных аппаратов. Учебное пособие /Б.М.Панкратов, В.С. Хохулин, В.П. Дронов, А.В.Колесников. Под ред. Б.М.Панкратова.-М.: Из-во МАИ,1990.-228с.

50. Нусинов М.Д. Воздействие и моделирование космического вакуума. – М.: Машиностроение,1982. -176 с.

51. Околосземное космическое пространство. / Справочные данные под ред. Ф.С. Джонсона. Пер. с англ. –М.: Мир, 1966. – 191 с.

52. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике. /Авдеевский В.С., Галицейский Б.М., Глебов Г.А. и др.. под ред. проф. В.К.Кошкина. -М.: Машиностроение, 1975. -623 с.

53. Панкратов Б.М. Основы теплового проектирования транспортных космических систем. – М.: Машиностроение, 1988. -304 с.

54. Палешкин А.В. Исследование и разработка методов моделирования внешнего теплообмена космических аппаратов с помощью инфракрасных источников излучения. //Кандидатская диссертация. 2011г.

55. Пехович А.И., Жидких В.М. Расчеты теплового режима твердых тел. 2-е изд., доп. и перераб. -Л.: Энергия, 1976. -352 с.

56. Поток энергии Солнца и его измерения : Сб. статей. //Под ред.О.Уайта, пер. с англ. -М.: Мир, 1980. -558 с.

57. Русин С.П., Палецкий В.Э. Тепловое излучение полостей. М.: Энергоатомиздат, 1987, 153 с.

58. Саммур Н. Техническое описание. Вакуумная камера CLIMATS. 2010.

59. Спэрроу Э.М., Сесс Р.Д. Теплообмен излучением. /Пер. с англ. -М.: Энергия, 1971. -296 с.

60. 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.

61. 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.

62. 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.

63. 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.

64. 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.

65. Теплообмен и тепловой режим космических аппаратов. /Под ред. Дж.Лукаса, пер. с англ. по ред. Н.А.Анфимова. -М.: Мир, 1974. -543 с.

66. Фаворский О.Н., Каданер Я.С. Вопросы теплообмена в космосе –М.: Высшая школа, 1972. -280 с.

67. Фридман В.М. О сходимости методов типа наискорейшего спуска. // Успехи математ. наук. – 1962. – Т. 17, вып. 3. – С. 201 – 208.

68. Хадсон Р. Инфракрасные системы. Перевод с английского под ред. Н.В. Васильченко. М. “Мир”. 1972.

69. Экспериментальная отработка космических летательных аппаратов / В.А.Афанасьев, В.С. Барсуков, М.Я. Гофин, Ю.В.Захаров, А.Н.Стрельченко, Н.П.Шалунов; Под редакцией Н.В.Холодкова. – М.: Изд-во МАИ, 1994. - 412с.

70. AIAA Space Simulation Testing Conference, 1964, 1966.
71. CAO Zhisong, PEI Yifei, LIU Shouwen, YIN Xiaofang, Infrared lamp array design and radiation heat flux analysis, Proceedings of the 7th IASME / WSEAS International Conference on HEAT TRANSFER, THERMAL ENGINEERING and ENVIRONMENT (HTE '09): 96-100
72. Chao B.T., Wedeking G.L. Similarity criteria for thermal modeling of Spacecraft. Journal of Spacecraft and Rockets. 1965, V.2. No.2.
73. Gary S. Ash, Ph.D., DynaVac, Hingham, MA, "Manufacturing of Cryoshroud Surfaces for Space Simulation Chambers", 25th Space Simulation Conference; 20-23 Oct. 2008.
74. Katzoff S. Similarity in Thermal Models of Spacecraft, NASA TN, D-1631, 1963, April.
75. Pollara, R. A., "Improved thermal vacuum chamber temperature control", 2014 European Conference on Spacecraft Structures, Materials and Environmental Testing, April 2014.
76. Santeller D.S., Jones D.W., Holheboer D.H. Vacuum Technology and Space Simulation. NASA, 1966.
77. Transactions of the Third International Vacuum Congress, Volume 1, 1966.
78. Wang Jing, Liu Shouwen, Pei Yifei Infrared lamp array simulation technology used during satellite thermal testing, International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering Vol:4, No:9, 2010.