

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

*На правах рукописи*



Шеметова Елена Владиславовна

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

Специальность:

05.07.03 — «Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов»

Диссертация

на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, с.н.с.

Колесников Анатолий Васильевич

Москва — 2021

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	5
Глава 1. Экспериментальное моделирование внешнего теплообмена КА в условиях, приближенных к натурным.....	17
1.1 Моделирование космического вакуума.....	17
1.1.1 Требования к моделированию.....	17
1.1.2 Структура систем и способы моделирования космического вакуума.....	18
1.2 Моделирование радиационных свойств космического пространства.....	22
1.3 Моделирование воздействия на КА электромагнитного излучения Солнца.....	24
1.3.1 Оптические схемы имитаторов солнечного излучения.....	25
1.3.2 Источники излучения, используемые в имитаторах солнечного излучения.....	27
1.3.3 Особенности известных имитаторов, выполненных по схеме Кассегрена.....	32
1.3.4 Примеры практического воплощения неосевой схемы солнечного имитатора.....	36
1.4 Моделирование воздействия на КА исходящего от планет излучения.....	39
1.4.1 Особенности полей теплового излучения планет и анализ перспектив их физической реализации.....	39
1.4.2 Погрешности моделирования теплового воздействия планет на поверхность КА при замене анизотропной модели поля интенсивности их излучения изотропной.....	42
1.4.3 Современная концепция экспериментального моделирования теплового воздействия планет на КА.....	44
1.5 Основные требования к конструкции и излучающим элементам	

инфракрасных имитаторов.....	45
Глава 2. Известные средства приближенного моделирования внешних тепловых нагрузок на поверхность КА.....	46
2.1 Инфракрасные имитаторы модульного типа с ленточными излучателями.....	46
2.2 Имитаторы на основе трубчатых ламп накаливания.....	48
2.3 Инфракрасные имитаторы модульного типа с условно точечными излучателями.....	50
2.4 Термоэкраны.....	52
2.5 Термоэкраны в сочетании с системой галогенных ламп накаливания.....	55
2.6 Сетчатые излучатели.....	56
2.7 Поверхностные управляемые электронагреватели.....	57
Выводы к главам 1 и 2.....	59
Глава 3. Исследование методов оптимизации энергетических режимов работы инфракрасных .....	60
3.1 Методы оптимизации режимов работы инфракрасных имитаторов модульного типа.....	60
3.1.1 Экстремальный метод оптимизации.....	60
3.1.2 Градиентные методы оптимизации.....	63
3.1.3 Результаты сравнения рассматриваемых методов.....	65
3.2 Анализ спектральных аспектов проблемы определения режима работы имитатора.....	68
Глава 4. Имитатор модульного типа с блочными условно линейчатыми излучателями .....	77
4.1 Методический подход к определению локальных угловых коэффициентов.....	78
4.2 Плотность теплового потока, падающего на элементы испытуемого объекта.....	81
4.3 Оптимизация режима работы имитатора.....	82

4.4 Вычислительный эксперимент.....	83
4.4.1 Геометрическая модель имитатора.....	84
4.4.2 Геометрическая модель испытуемого объекта.....	85
4.4.3 Результаты расчета.....	86
4.4.4 Выводы по результатам вычислительного эксперимента.....	90
4.5 Исследование по вопросу о целесообразности использования в конструкции модуля имитатора трубчатых ламп накаливания .....	91
4.5.1 Радиационные свойства трубчатых ламп накаливания с вольфрамовой спиралью.....	92
4.5.2 Радиационная модель лампы.....	93
4.5.3 Результаты исследования и их обсуждение.....	97
Заключение .....	102
Список сокращений и условных обозначений.....	104
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	105

## ВВЕДЕНИЕ

### Актуальность темы диссертации

Одним из условий надежного функционирования космического аппарата является обеспечение необходимого теплового режима всех его элементов. Тепловое состояние КА в основном определяется взаимосвязанными процессами внешнего и внутреннего теплообмена, и соответствующей организацией, и регулированием этих процессов.

Математическое моделирование теплообмена космического аппарата связано с трудностями, обусловленными сложностью и возможной значительной неопределенностью протекания физических процессов внешнего и внутреннего теплообмена между элементами КА [42]. Поэтому при проектировании и создании КА актуальным является тепловая отработка, представляющая собой сочетание различных тепловых экспериментов и проводимых на основе их результатов мероприятий по доработке средств обеспечения теплового режима, а иногда и конструкции аппарата.

Тепловакуумные испытания космического аппарата делятся на ряд типов в зависимости от особенностей испытуемого объекта, условий его штатной эксплуатации и характера решаемых при экспериментальных исследованиях задач. При этом такие испытания занимают особое место в экспериментальной отработке в виду их сложности, трудоемкости, а также значительному расходованию материальных средств. При этом отличительной особенностью их является моделирование в экспериментальной установке космических условий полета или условий пребывания на поверхности не имеющих атмосферы небесных тел.

Подготовка такого рода испытаний сводится, главным образом, к деятельности по трем направлениям:

- 1) Моделирование испытываемого объекта.
- 2) Выбор среди доступных для использования таких тепловакуумных установок, которые, с одной стороны, были бы оснащены имитационными средствами, способными с достаточной точностью воспроизводить основные факторы космического пространства, оказывающие влияние на тепловое состояние

КА, а другой стороны, оказались бы приемлемыми для разработчика аппарата по экономическим и организационным соображениям. При этом возможна доработка, дооснащение и даже модернизация имеющихся в составе экспериментальной установки средств моделирования условий внешнего теплообмена КА.

3) Планирование испытаний, связанное с определением наиболее целесообразных режимов испытаний, определением потребной продолжительности испытаний и т.п.

Достаточно точное моделирование испытываемого объекта является весьма важной задачей, решение которой в значительной степени определяет правомерность перенесения результатов испытаний на “натуру”. Возникают трудности, связанные с моделированием объекта испытания (деградация покрытий, погрешности в модели испытаний), но значительно сложнее обстоит дело с решением задачи моделирования условий внешнего теплообмена КА. Одновременное воспроизведение в экспериментальной установке всех факторов космической среды, оказывающих влияние на тепловое состояние КА - задача практически неразрешимая. Поэтому работы по экспериментальному исследованию влияния факторов космической среды разделяют на группы видов воздействия, изучая их в отдельных экспериментальных установках. В работах [6,24,40] показано, что при тепловой отработке изделия в целом или его отдельных частей достаточно моделировать в экспериментальной установке основные факторы космического пространства, которые влияют на тепловое состояние космического аппарата, т.е. тепловое воздействие излучения Солнца и излучение тех небесных тел, вблизи которых находится аппарат, высокий вакуум, а также «черноту» и «холод» космического пространства. Воздействие факторов, оказывающих косвенное влияние на тепловой режим КА – рентгеновское и ультрафиолетовое излучение Солнца, микрометеорные потоки, корпускулярную радиацию можно исследовать отдельно в специальных лабораторных установках, а полученные данные можно учитывать при составлении программы и методики испытаний КА посредством выбора режимов испытаний, ориентации испытываемого объекта в экспериментальной установке и выбора режимов работы

имитаторов внешних источников излучения, воздействующих на поверхность КА, а также и за счет преднамеренного изменения радиационно-оптических характеристик покрытий некоторых элементов наружной поверхности испытываемого объекта.

Несмотря на упрощение, связанное с разделением внешних факторов космической среды на отдельные группы и на раздельное изучение их воздействия на характер протекания внешних внутренних и внутренних тепловых процессов КА задача достаточно точного экспериментального моделирования влияния внешнего теплообмена КА на его тепловое состояние все еще является актуальной несмотря на то, что исследования в этой области ведутся давно – с начала развития практической космонавтики. Имеются значительные достижения, реализованные на практике в экспериментальных установках или существующие в технических проектах.

Еще на ранней стадии развития практической космонавтики на базе достижений вакуумной и криогенной техники были созданы системы, моделирующие в наземных экспериментальных установках с удовлетворительной точностью космический вакуум и радиационные свойства космического пространства. Сложнее оказалось решение проблемы имитации потоков излучения по основным своим параметрам, приходящих к КА от Солнца, Луны и планет.

Используя достижения оптики, теплотехники, светотехники, вакуумной техники, автоматики и других прикладных наук, интенсивно проводились проектно-конструкторские и научные работы в обеспечение создания экспериментальных установок, с помощью которых можно было бы успешно решать тепловые аспекты проблемы создания космических аппаратов различного назначения, имитируя в этих установках потоки излучения, приходящие к их поверхности и оказывающие влияние на тепловое состояние его конструкции, оборудования и систем.

Однако между точностью воспроизведения тех или иных факторов космического полета и стоимостью создания, и эксплуатации соответствующих имитационных средств существует прямая и весьма сильная зависимость, и решить

проблему высокоточного моделирования некоторых видов воздействия космической среды на полномасштабный макет космического аппарата часто оказывается или чрезвычайно сложно (из-за технических и экономических ограничений), а иногда и невозможно.

Можно отметить несколько ситуаций, возникающих при штатной эксплуатации КА, которые чрезвычайно трудно, а иногда и невозможно смоделировать в условиях испытания КА в наземных экспериментальных установках.

- Технически невозможно воспроизвести анизотропную модель поля излучения планет, спутников планет, крупных астероидов в объеме, соизмеримом с объемом экспериментальной установки.

- В космосе может происходить значительное изменение поглощательных свойств радиационно-оптических покрытий поверхностей КА под воздействием жесткого электромагнитного излучения Солнца в рентгеновском и ультрафиолетовом диапазонах его спектра, в то время как в земных условиях создать источники излучения с такими же спектральными характеристиками и ввести их в состав осветительной части полноразмерного имитатора Солнца практически невозможно.

- Очень трудно достаточно достоверно смоделировать динамику изменения радиационных и оптических характеристик зеркальных и рабочих элементов оптических приборов под воздействием микрометеорных потоков, вызывающих эрозию поверхностных слоев полированных металлических поверхностей и оптических стекол.

- Появление крупногабаритных космических аппаратов астрофизического назначения и собираемых на околоземной орбите многомодульных аппаратов требует создания очень крупных и чрезвычайно дорогих в эксплуатации экспериментальных установок, что порождает самые серьезные сомнения в целесообразности реализации концепции экспериментальной отработки, заключающейся в стремлении достигнуть максимально полную имитацию условий внешнего теплообмена космического аппарата.

- Космический аппарат, если он по программе полета не находится в режиме постоянно-солнечной ориентации, подвергается воздействию переменных по времени и пространственной ориентации лучистых полей, источником которых может быть тепловое излучение небесных тел, вблизи которых находится КА и Солнце. Поскольку вращение в ЭУ имитатора Солнца и имитатора поля излучения планет (если бы он даже и имелся) является практически неразрешимой технической задачей, остается только один путь моделирования воздействия на КА переменных по времени и пространственной ориентации внешних лучистых полей - за счет вращения ИО вокруг двух взаимно перпендикулярных осей. Однако, такое вращение возможно осуществить лишь для легких аппаратов. Тяжелые КА допускают вращение в экспериментальной установке только вокруг одной продольной оси.

Вот далеко не полный перечень проблем, с которыми приходится сталкиваться, решая те задачи экспериментальной отработки космической техники, которые в той или иной степени связаны с необходимостью моделирования в процессе испытаний условий внешнего теплообмена.

В связи со значительным изменением условий создания космической техники, заслуживающими пристального внимания становятся следующие два направления методической деятельности по совершенствованию технологии и методологии тепловой отработки космической техники:

1) Работы в обеспечение реализации концепции поотсечной тепловой отработки как крупногабаритных, так и среднеразмерных КА.

2) Работы по обеспечению достаточно точного воспроизведения требуемых внешних тепловых нагрузок на поверхность КА с помощью различных имеющихся и только разрабатываемых упрощенных имитационных средств на основе использования инфракрасных источников излучения.

Отмеченные направления деятельности в значительной степени взаимосвязаны. Зависимость эта обусловлена в первую очередь тем, что тепловую отработку отдельных небольших частей КА можно осуществить в не крупных и относительно недорогих в эксплуатации экспериментальных установках. При этом

расширяется возможность выбора этих установок и, что немаловажно, уменьшается влияние различных организационных факторов на сроки проведения экспериментальных исследований.

Анализируя конструктивные, энергетические, радиационно-оптические и теплофизические характеристики известных и доступных для изучения отечественных и зарубежных космических аппаратов, в первую очередь крупногабаритных, можно сделать следующий вывод: они допускают деление на достаточно независимые в отношении внутреннего теплообмена отсеки, в то время как во внешнем теплообмене взаимное влияние может проявляться и у довольно разобщенных в конструктивном отношении частей. Если первое обстоятельство создает благоприятные условия для реализации метода поотсечной отработки КА, то второе затрудняет его реализацию. Однако трудности, обусловленные внешним тепловым взаимным влиянием отдельных частей КА, можно считать преодолимыми, поскольку существуют положительно зарекомендовавшие себя методики и компьютерные программы расчета облученности элементов КА источниками внешних тепловых потоков.

Для экспериментального моделирования воздействия на поверхность испытуемых объектов расчетных значений внешних лучистых тепловых потоков могут использоваться или имитаторы солнечного излучения в совокупности с системой инфракрасных источников излучения, или только система инфракрасных источников излучения, размещаемых вокруг испытуемого объекта.

Столкнувшись с трудностями реализации концепции наземной экспериментальной отработки космической техники в условиях, максимально приближенным к натурным условиям эксплуатации, разработчики космической техники все большее внимание уделяют приближенным методам физического моделирования внешнего теплообмена КА и разработке математического и программного обеспечения управления энергетическими характеристиками технических средств, реализующих эти методы.

При этом в настоящее время на первый план вышла задача рационализации испытаний, то есть, задача получения достоверных результатов при минимально возможных затратах.

### **Степень разработанности темы**

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

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

### **Цель работы**

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

### **Основные решаемые в работе задачи**

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

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

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

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

### **Научная новизна**

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

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

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

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

**Теоретическая значимость работы** определяется её научной новизной.

### **Практическая значимость работы**

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

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

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

#### **Методология и методы исследования**

Для решения поставленных в диссертации задач использовались:

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

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

#### **Достоверность и обоснованность результатов работы**

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

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

### **Апробация работы**

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

### **Публикации**

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

### **Структура и объем работы**

Диссертационная работа объемом 111 страниц состоит из введения, 4 глав, заключения, списка использованных источников из 69 наименований; содержит 25 рисунка и 3 таблицы.

**Во введении** обосновывается актуальность выбранной темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, отмечается новизна полученных результатов.

**В первой главе** диссертации рассматривается вопрос о перспективах экспериментального моделирования внешнего теплообмена КА в условиях, приближающимся к натурным. Показано, что экспериментальное моделирование влияния космического вакуума, радиационных свойств космического пространства являются вполне решаемыми с нужной точностью задачами. Не является

проблемой моделирование воздействия нежесткого электромагнитного излучения Солнца на КА, функционирующего в космосе в режиме постоянной солнечной ориентации. Однако моделирование совместного воздействия переменных по времени и ориентации полей излучения, исходящего от Солнца, планет, частей самого космического аппарата, не вошедших в состав испытываемого объекта, во многих случаях является практически неразрешимой задачей.

В связи с этим все большее внимание уделяется использованию имеющихся и только разрабатываемых средств воспроизведения требуемых внешних тепловых нагрузок на поверхность КА с помощью упрощенных имитационных средств на основе инфракрасных источников излучения.

Размещаемые в тепловакуумной установке вокруг испытываемого объекта, различные по конструкции и по способу подвода энергии эти имитаторы имеют особенность, заключающуюся в том, что в их рабочем объеме не воспроизводят параметры полей излучения источников, тепловое воздействие которых на поверхность КА они призваны воспроизводить в процессе испытаний. Воспроизводятся лишь расчетные значения внешних тепловых нагрузок, источником которых, могут быть тепловое излучение планет, их спутников, электромагнитное излучение Солнца, а также тепловое излучение тех частей КА, которые не вошли в состав испытываемого объекта, например, по причине ограниченности размеров экспериментальной установки.

**Во второй главе** представлено описание и краткий анализ известных средств приближенного моделирования внешних тепловых нагрузок на поверхность КА с помощью систем инфракрасных источников излучения. При анализе акцентируется внимание на недостатки известных средств.

**Третья глава** диссертации посвящена исследованию методов определения оптимальных энергетических режимов работы инфракрасных имитаторов с учетом зависимости спектральных радиационных характеристик излучателей имитатора от оптимизируемого вектора управления  $J(0)$ , в качестве которого обычно принимается интенсивность излучения модулей имитатора. Показано, что для испытываемых объектов с несерыми покрытиями наружных поверхностей

необходима корректировка известных методик решения задачи выбора оптимальных режимов работы имитаторов, используя итерационный процесс поиска решения задачи, заключающийся в многократном определении вектора  $J(0)$  и одновременном уточнении значений поглотительной способности элементов поверхности испытываемого объекта на основании полученных на каждой итерации значений вектора  $J(0)$ .

**Четвертая глава** диссертации посвящена разработке методического обеспечения эксплуатации имитаторов модульного типа с размещаемыми в виде блоков условно линейчатыми излучателями, а также исследованию вопроса о целесообразности использования в конструкции блочных модулей трубчатых ламп накаливания с вольфрамовой спиралью, в частности галогенных.

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

## **Глава 1. Экспериментальное моделирование внешнего теплообмена КА в условиях приближенных к натурным**

Говоря о моделировании условий внешнего теплообмена КА, приближающихся к натурным, имеют в виду условия, описываемые общепринятыми моделями проявления тех факторов космического пространства, которые в наибольшей степени влияют на тепловое состояние КА.

Считают в [6,24,40], что при исследовании в целом или отдельных систем космического аппарата достаточно воспроизводить в ЭУ следующие факторы космического пространства, которые влияют на тепловое состояние аппарата: тепловое излучение Солнца и излучение тех небесных тел, вблизи которых находится аппарат, высокий вакуум, а также «черноту» и «холод» космического пространства.

Рассмотрим принципы моделирования отмеченных факторов космического пространства, акцентируя внимание на возникающие при реализации этих принципов трудности.

### **1.1 Моделирование космического вакуума**

#### **1.1.1 Требования к моделированию**

Требования, предъявляемые к системам, которые моделируют космический вакуум при исследовании теплового состояния космического аппарата [19, 39]:

- давление газовой среды в ЭУ должно быть настолько малым, чтобы теплообмен между не контактирующими поверхностями осуществлялся в основном излучением.

- коэффициент  $Z$  возврата частиц, покидающих поверхность КА в ЭУ должен быть малой величиной.

- необходимо (по возможности) исключить попадание на объект исследования паров органических веществ (например, масел), источником которых являются откачные средства систем вакуумирования.

Выполненные в [19] оценки величины давления  $p$  газовой среды, при котором в экспериментальной установке, как и в космосе, можно пренебречь теплопередачей за счет теплопроводности остаточного газа, свидетельствуют о том, что давление на уровне  $p < 10^{-4}$  Па является вполне приемлемым в установках, предназначенных для исследования тепловых режимов КА.

Из-за зависимости степени загрязнения поверхности космического аппарата продуктами собственного выделения от коэффициента возврата, необходимо моделировать условия, при которых этот коэффициент является пренебрежимо малой величиной.

Пренебрежимо малое значение  $Z$  может быть реализовано только в том случае, если откачные устройства, моделирующие космический вакуум, являются частью внутренней поверхности установки.

### **1.1.2 Структура систем и способы моделирования космического вакуума**

Структура системы моделирования космического вакуума определяется в основном составом подлежащих откачке газов и паров, а также требуемой величиной вакуума. В связи с многообразием откачиваемых газов и паров, а также ограниченностью технических средств, позволяющих одинаково эффективно откачивать газ в диапазоне давлений от атмосферного ( $10^5$  Па) до рабочего ( $\approx 10^{-4}$  Па), обеспечивая при этом реализацию нужных больших, как правило, объемных скоростей откачки, одновременно используются насосы различных типов: насосы предварительной, основной и вспомогательной откачки.

Вспомогательная откачка действует одновременно с основной и необходима вследствие избирательного откачного действия насосов основной откачки.

Для основной откачки применяют насосы, так называемого, поверхностного действия, использующие в максимально возможной степени внутреннюю

поверхность установки. Это, главным образом, криогенные насосы конденсационного типа.

Принципом действия таких насосов заключается на вымораживании откачиваемых паров и газов. А значит, образовании жидкой или твердой фазы откачиваемого газа на криоповерхностях и, следовательно, в понижении суммарного и парциально давления газов и паров в откачиваемом рабочем объеме. Криоконденсация может эффективно применяться для откачки газов, равновесное давление насыщенных паров которых при температуре криоповерхности является более низким, чем требуемое давление.

Для каждой температуры имеются свои, так называемые, неконденсируемые газы с равновесным давлением насыщенных паров, превышающим заданное. Так при температуре жидкого азота  $N_2$  ( $\approx 77$  К) не конденсируются инертные газы, при температуре жидкого водорода ( $\approx 20$  К) не конденсируется водород и гелий; при температуре жидкого гелия не конденсируется частично водород и гелий. Поэтому при использовании криоконденсационных насосов в качестве основной откачки для достижения в экспериментальной установке высокого вакуума необходимо использовать, помимо насосов криоконденсационного типа, насосы вспомогательной откачки, имеющие другие принципы откачки газов из рабочего объема ЭУ.

Конструктивно криогенные насосы выполняются в виде криорешеток, а по внутренним каналам циркулирует хладагент.

Однако исключительно криогенная откачка камеры нереальна для конденсации неона, водорода и гелия требуются очень низкие температуры ( $T < 4$  К). В состав воздуха входит (по объему)  $1,8 \cdot 10^{-3}$  неона,  $0,5 \cdot 10^{-4}$  водорода и  $5,3 \cdot 10^{-4}$  гелия. В сумме эти три компонента занимают объем  $2,38 \cdot 10^{-3}$ , что соответствует их суммарному парциальному давлению 2,4 Па. При таком составе газа даже при  $T = 20$  К высокий вакуум не может быть получен. Отсюда следует, что уменьшить объемное содержание неона, водорода и гелия необходимо другими методами откачки.

В качестве насосов вспомогательной откачки в современных установках используются комбинации насосов различных типов.

Ранее в качестве насосов вспомогательной откачки применялись только паромасляные диффузионные насосы, присоединяемые извне к вакуумной камере с помощью соединительных патрубков. Такая внешняя откачка неприемлема в качестве основной по причине недостаточности объемной скорости, ограниченной вакуумной проводимостью соединительных патрубков. Для обеспечения в больших установках необходимой скорости откачки с помощью паромасляных диффузионных насосов, то есть для реализации основной откачки потребовалось бы размещение вне рабочего объема установки многочисленных насосов, что может вызвать появление эксплуатационных и конструктивных трудностей, а также к усиленной миграции масла в рабочий объем установки. Появление потока паров масла внутри моделирующей установки является недопустимым из-за загрязнения поверхности КА и оптических элементов имитаторов лучистых потоков вследствие конденсации на них паров масла. Можно существенно уменьшить, но не исключить, миграцию масла, применяя специальные клапанные устройства и охлаждаемые жидким азотом ловушки. Вместо вакуумного масла в диффузионных насосах может использоваться и ртуть. В этом случае насосы называются ртутными пароструйными.

Более перспективными для вспомогательной откачки являются криосорбционные насосы и электрофизические средства откачки. Криосорбционная откачка происходит в результате физической и химической адсорбции газов на специальных охлаждаемых твердых телах (сорбентах). Используются, в основном, два метода криосорбционной откачки:

- 1) адсорбция газов на охлаждаемых металлических пленках, непрерывно напыляемых на подложки в процессе откачки;
- 2) адсорбция газов охлажденными пористыми телами.

Первый метод основан на физическом и химическом связывании газов поверхностями, на которые в процессе работы наносятся слои активных веществ - геттеров. Используемый металл (геттер) осаждается на охлаждаемой подложке

в виде пленок, сорбирующих откачиваемые газы. В качестве газопоглотителей применяют пленки титана, вольфрама, палладия, никеля и других металлов. Наиболее широко используют пленки титана. Титановые геттерные насосы имеют достаточно высокую начальную удельную скорость откачки для наиболее распространенных типов газов:  $O_2$ ,  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$  и др.

Однако инертные газы этими насосами откачиваются плохо. Геттерные насосы имеют и такие недостатки, как малая скорость откачки органических соединений и снижение производительности при откачке углекислого газа, проникновение паров металла, т.е. геттера в откачиваемый рабочий объем.

Другой метод криосорбционной откачки основан на использовании в качестве адсорбентов мелкопористых веществ (активированного угля, силикагелей, цеолитов). Адсорбент необходимо периодически регенерировать (восстанавливать адсорбционные свойства) путем нагрева в вакууме для десорбции адсорбента.

Принципом действия электрофизических средств откачки является ионизация молекул откачиваемых газов, различные комбинации способов генерации пара геттеров, и ускорения образованных ионов с последующим протеканием различных физико-химических процессов при взаимодействии частиц с поверхностью сорбции. По способу нанесения геттерных покрытий рассматривают магнитные электроразрядные, ионно-геттерные и комбинированные насосы.

Принцип действия ионно-геттерных насосов заключается в удалении молекул откачиваемого газа в результате его ионизации, хемосорбции активных газов, испарении химически активных металлов, внедрение ионов инертных газов и их “замуровывание”.

В настоящее время для вспомогательной откачки широко используются турбомолекулярные вакуумные насосы, содержащие ряд статорных и роторных дисков с радиальными косыми пазами.

При вращении ротора насоса молекулам откачиваемого газа сообщается импульс в направлении выпускного патрубка. Динамический напор молекулярного газа, образующийся вследствие импульса, уравнивает перепад давлений в проточной части насоса, которую составляют диски с пазами. Турбомолекулярные

вакуумные насосы имеют следующие достоинства перед другими средствами откачки: обладают способностью откачивать все газы в независимости от их химического состава, величины давления насыщенных паров при определенной температуре, молекулярного веса; не загрязняют среду объема, который подвергается откачки, парами углеводородов или другими рабочими телами, как геттерные насосы, диффузионные и др.; имеют большую быстроту действия при откачке газов с малой молекулярной массой, которые трудно удаляются из высоковакуумных систем. Предельное разряжение на входе турбомолекулярных насосов составляет приблизительно  $10^{-6}$  Па при форвакууме порядка  $10^{-2}$  Па.

Таким образом, имеется широкий выбор реально существующих средств откачки вакуумных камер, используя которые в нужных сочетаниях можно с удовлетворительной точностью моделировать в экспериментальной установке приемлемый вакуум и низкий коэффициент возврата газовых частиц.

## **1.2 Моделирование радиационных свойств космического пространства**

«Холод» и «черноту» космоса моделируют с помощью экранов, охватывающих рабочий объем установки и охлаждаемых до низких температур криогенным хладоносителем. Эти же экраны выполняют и функцию насосов основной откачки вакуумной камеры. На экраны наносится покрытие, обладающее высоким значением поглощательной способности во всем диапазоне спектра теплового излучения. Считается, например в [19,24], что моделирование «холодного» (т.е. практически ничего не излучающего космического пространства) в большинстве случаев может осуществляться с удовлетворительной точностью с помощью охлаждаемых до температур кипящего азота экранов ( $T \approx 77$  К). Однако конструктивные особенности экранов могут явиться источником существенных погрешностей моделирования. Экраны, как правило, выполняются в виде ребренных каналов. Вследствие этого участки ребер, наиболее удаленные от каналов, по которым циркулирует хладоноситель, могут иметь температуры существенно превышающие температуру кипящего азота. Из-за этого

радиационная температура экрана в целом может значительно превышать температуру хладоносителя и экраны могут явиться источником заметного фонового излучения. Данное обстоятельство необходимо учитывать при интерпретации результатов эксперимента.

Для моделирования «черноты» космического пространства (идеальных поглотительных его свойств) на экраны наносятся покрытия, обладающие максимально возможной поглотительной способностью по отношению к падающему на него излучению, источником которого может быть имитатор Солнца, собственное и отраженное излучение самого испытуемого объекта, излучение, исходящее от других внутренних элементов вакуумной установки, например, от излучателей, призванных воспроизводить тепловое воздействие планеты и т.п.. Однако поглотительная способность имеющихся и пригодных для использования покрытий в тепловой части спектра излучения, как правило, не превышает величину 0,96. За счет придания поверхностям экранов макрошероховатости поглотительную способность их можно поднять и до величины 0,99. Под макрошероховатостью здесь понимаются различные конструктивные решения по приданию экранам свойств модели абсолютно черного тела. Для этого можно, например, на толстой стенке экрана создать шероховатости, которые имеют вид канавок треугольного, трапецивидного, прямоугольного профиля, а также можно выполнить криогенные экраны в виде решеток, открытых сотовых конструкций и т.д.. Но в процессе работы ТВК из-за образования на экранах криоосадка поглотительная способность экранов может существенно снизиться (до величины 0,9 и даже ниже). Следовательно, достаточно точное моделирование идеальных поглотительных свойств космического пространства для всех возможных случаев – задача практически невыполнимая. Экраны тепловакуумной установки должны иметь максимально достижимую поглотительную способность, например, величину порядка 0,97 - 0,98. А в каждом конкретном случае, необходимо детально изучить вопрос о благоприятном расположении испытуемого объекта в тепловакуумной камере и о режиме работы имитатора Солнца. Кроме того, в ряде случаев целесообразно изменить

облицовочный материал матов экранно-вакуумной изоляции или изменить покрытия наружных поверхностей, чтобы уменьшилось влияние потоков фонового излучения на тепловое состояние испытываемого объекта.

Говоря о качестве моделирования радиационных свойств космического пространства в наземных экспериментальных установках, необходимо иметь в виду следующее важное обстоятельство: в криогенных экранах в силу эксплуатационных и технологических необходимостей приходится делать некоторые вырезы, которые становятся заметными источниками потоков фонового излучения, возмущающего тепловое состояние испытываемого объекта.

### **1.3 Моделирование воздействия на КА электромагнитного излучения Солнца**

Перспективным способом моделирования, основой которой является полная имитация теплового потока излучения Солнца в отношении к необходимому результату по основным его свойствам: степени параллельности, спектру, плотности. Анализируя имеющиеся системы имитации солнечного излучения, можно говорить о том, что трудности, встречающиеся на пути создания достаточно совершенных имитаторов Солнца, в принципе преодолимы, но при этом существует прямая и достаточно сильная взаимосвязь между точностью и стоимостью разработки, а также эксплуатации таких имитаторов. Поэтому в настоящее время есть запрос разработчиков космической техники на имитаторы, отвечающие разумным требованиям по точности воспроизведения основных параметров потока солнечного излучения.

Основными элементами всякого имитатора солнечного излучения являются источники излучения и спрямляющая система. Последняя предназначена для формирования потока излучения с малорасходящимися лучами и может включать в себя преломляющие, отражающие и поглощающие элементы. В связи с тем, что эти элементы могут применяться в различных сочетаниях, а также в связи с многообразием применяемых источников излучения строгая классификация схем

имитаторов затруднена. Однако две группы оптических схем все же можно выделить - осевую и неосевую. В этих схемах источники излучения располагаются за пределами вакуумного объема экспериментальной установки, а элементы спрямляющей системы располагаются внутри вакуумной камеры.

### 1.3.1 Оптические схемы имитаторов солнечного излучения

#### 1) Осевые схемы.

Известны три оптические осевые схемы, которые, которые могут, в принципе, использоваться в имитаторах солнечного излучения: системы Кассегрена, Ньютона и Грегори [18,19,24]. В этих системах, схематично изображенных на рисунке 1.1, кроме основного параболоидного зеркала применяют вторичные зеркала, расположенные перед основным в окрестности его фокуса. Но в известных имитаторах солнечного излучения, выполненных по осевой схеме, воплощена только система Кассегрена.

Осевым схемам свойственны три серьезных недостатка:

- Вторичные зеркала могут существенно затенять испытуемый объект от излучения, исходящего от основного (параболоидного) зеркала.
- Исходящий от испытуемого объекта поток излучения, попадая на основное зеркало и отражаясь от него может вновь попасть на объект, то есть объект как бы «видит» себя в зеркале, что приводит к появлению фонового излучения;
- Вторичные зеркала, подвергаясь воздействию лучистых потоков большой плотности и нагреваясь при этом, нуждаются в охлаждении.

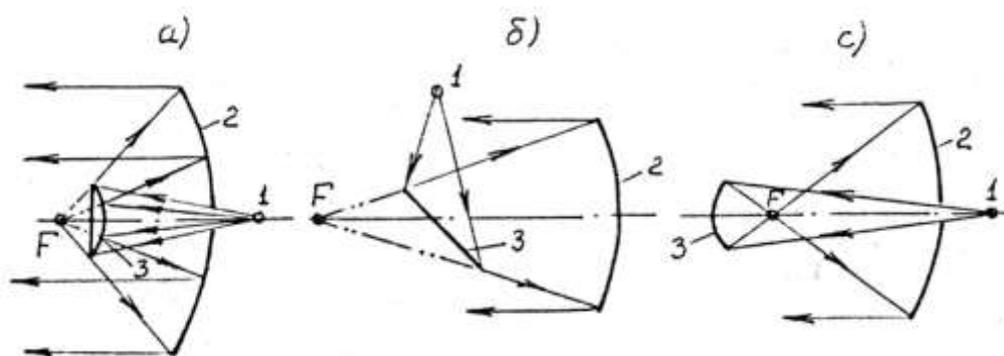


Рисунок 1.1 - а - схема Кассегрена; б - схема Ньютона; в - схема Грегори

## 2) Неосевые схемы.

Если в качестве коллиматора рассмотреть часть зеркальной поверхности параболоида вращения, расположенная в стороне от оси вращения и точечный источник излучения расположить в фокусе этого параболоида, то полученная таким образом излучающая система (система Гершеля) будет обладать рядом преимуществ, благодаря которым ее в основном и реализуют в имитаторах потока солнечного излучения. Рассмотрим эти преимущества:

- Источник излучения не затеняет поток солнечного излучения, который исходит от зеркала в сторону рабочего объема тепловакуумной установки;
- На некотором удалении от зеркала имеется объем, который обладает свойством, что излучение, исходящее из этого объема и падающее на зеркало, после переотражения вновь в рабочий объем не возвращается (см. рисунок 1.2).
- Число оптических элементов является минимальным.

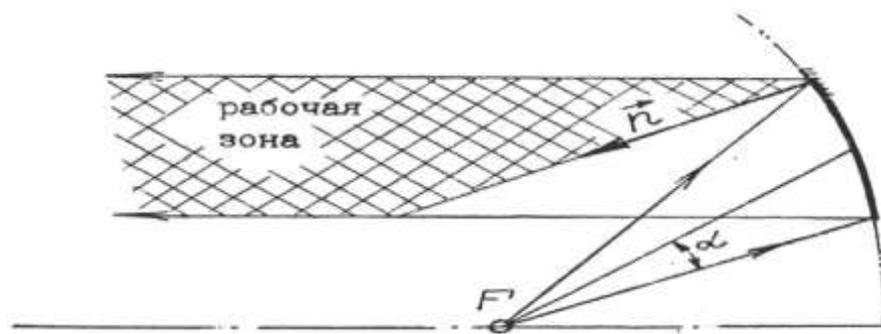


Рисунок 1.2 - Схема Гершеля

Схема имеет недостаток. При точечном источнике излучения с независимой от направления интенсивностью плотности параллельного потока излучения по сечению пучка является переменной величиной. Наибольшая плотность потока излучения будет иметь место в области, расположенной ближе к оси симметрии параболоида, наименьшая - в наиболее удаленных от оси симметрии зонах. Следовательно степень неоднородности потока излучения по сечению пучка будет зависеть от величины апертурного угла  $\gamma$ . В большинстве имитаторов, в которых реализована неосевая схема, этот угол является небольшим, что достигается

обычно за счет увеличения размеров тепловакуумной установки в целом или ее оптического отсека.

Известно значительное количество вариантов конструктивной реализации неосевой схемы имитатора солнечного излучения. Принципиальное отличие таких имитаторов заключается в особенностях строения оптических схем осветительной части, в которой формируется лучистый поток. Поток, падающий на проекционные зеркала после прохождения через входные оптические блоки, например, входные линзы - известны случаи использования сферических зеркал, но чаще всего параболоидные.

Следует заметить, что крупные зеркала сложно изготовить сплошными. Проще выполнить их в виде совокупности плотно уложенных криволинейных или плоских зеркальных элементов (фасет). Однако замена сплошного зеркала фасеточным приводит к появлению дополнительных погрешностей. Уровень этих погрешностей зависит от формы поверхности фасет, относительных их размеров, конструкции каркаса зеркала, условий охлаждения элементов конструкции, качества юстировки, то есть от множества конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов.

### **1.3.2 Источники излучения, используемые в имитаторах солнечного излучения**

Как известно, основная часть энергии излучения Солнца, влияющая на тепловой режим КА, заключена в интервале длин волн  $[0,3;3]$  мкм. При использовании в имитаторе излучения Солнца, источником излучения считается совершенным, если в приведенном диапазоне длин волн относительная величина спектральной интенсивности солнечного излучения отличается от спектра излучения Солнца не более, чем на 5%. Однако, имея в распоряжении экспериментаторов источники не удовлетворяют этому требованию в полной мере. На том или другом участке отмеченного спектрального диапазона спектральные погрешности превышают 5%, иногда весьма значительно. Рассмотрим, какие

конкретно источники излучения используются в имитаторах солнечного излучения.

Чаще всего используются шаровые дуговые лампы высокого давления с ксеноновым наполнением. Спектр излучения дуговых ламп мало отличается от спектра солнечного излучения, кроме интервала длин волн  $[0,8; 1,05]$  мкм. В этом интервале наблюдаются значительные выбросы энергии по относительной величине более, чем в два раза, которые превышают величину энергии солнечного излучения в этой полосе спектра (рисунок 1.3). Также следует отметить, что в интервале  $\lambda \in [0,8; 1,05]$  мкм содержится приблизительно 15% интегральной энергии излучения Солнца, а у ксеноновой лампы - более 30% от общей энергии излучения. В некоторых имитаторах этот характерный выброс энергии излучения ксенона поглощается с помощью специальных покрытий (фильтрами), которые наносятся на поверхность линз, через которые излучение Солнца заводится внутрь тепловакуумной установки, а затем попадает на проекционную часть имитатора - зеркала. В результате такой корректировки спектр излучения имитатора становится в основном похожим на спектр излучения Солнца. В других же имитаторах спектр ксеноновых ламп не корректируется, поэтому большой интерес представляет информация об уровне возможных спектральных погрешностей. Расчет спектральных погрешностей  $\Delta \bar{A}_s$  можно осуществить на основе данных о спектральном распределении энергии излучения, которые используются в имитаторах и данных по спектральной поглощательной способности  $A_\lambda$  различных покрытий и материалов, применяемых в космической технике и подвергающихся воздействию солнечного излучения. Ниже представлена таблица 1.1, в которой приведены результаты расчета спектральных погрешностей для 13 материалов и покрытий при использовании лампы-светильника ДКсРМ-55000 (рисунок 1.3).

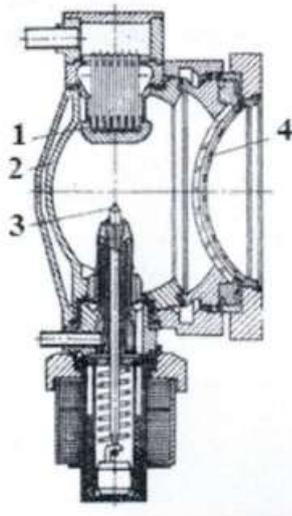


Рисунок 1.3 - Конструкция ксеноновой лампы-светильника ДКсРМ- 55000

- 1- водоохлаждаемый анод; 2- металлический корпус; 3- подвижный катод;  
4- охлаждаемый водой купольное окно из кварцевого стекла

Исходящее от лампы излучение испускается в телесном угле, приблизительно ограниченном конусом с углом полураствора в  $30^{\circ} \div 40^{\circ}$ . Направленность излучения достигается тем, что внутренняя поверхность корпуса лампы выполнена в виде зеркального эллипсоида, в одном из фокусов которого горит дуга. Параметры эллипсоида выбраны такими (эксцентриситет равен приблизительно 0,5), чтобы 2-ой его фокус, а, следовательно, и увеличенное изображение дуги находились за пределами лампы. Выходное окно лампы выполнено в виде совокупности двух вогнутых кварцевых стекол, между которыми циркулирует вода. Благодаря вогнутой форме стекол, работающий на сжатие (так как сжимающие напряжения кварца, в 20 раз больше, чем на растяжение и предел прочности как у стали), лампа является взрывобезопасной. Однако, для нормальной ее работы необходимо, чтобы продольная ось лампы была горизонтальна или отклонялась от этого положения не более чем на  $15^{\circ}$ . Спектр излучения данной лампы соответствует спектру излучения дуговых шаровых ламп высокого давления с ксеноновым наполнением. Но при  $\lambda > 1,3$  мкм энергия излучения практически отсутствует. Это обусловлено поглощением излучения водой, которая циркулирует между двойными стеклами

выходного окна лампы рисунка 1.3. На рисунке 1.4. представлены зависимость относительной величины спектральной интенсивности излучения  $\bar{J}_\lambda$  от длины волны и спектр излучения Солнца.

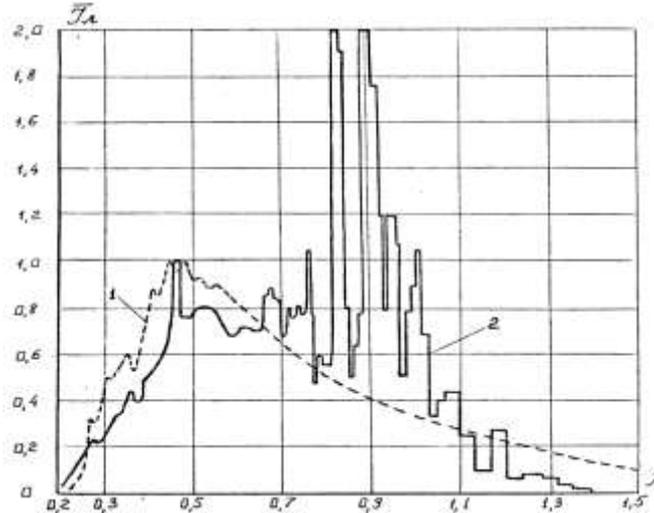


Рисунок 1.4 - Спектр излучения дуговой ксеноновой лампы ДКсРМ-55000

Таблица 1.1 Спектральные погрешности при использовании в качестве источника излучения лампы ДКсРМ-55000

N	Вид покрытия	$A_s$	$A_{им}$	$\Delta A_s$
1	Серебряное покрытие	0,078	0,064	-0,18
2	Золоченое покрытие	0,24	0,19	-0,23
3	Белая эмаль	0,29	0,23	-0,22
4	Алюминий	0,085	0,088	0,042
5	Керамическое покрытие	0,23	0,17	-0,26
6	Хромированное покрытие	0,37	0,40	0,097
7	АМГ-6	0,30	0,31	0,03
8	Белая стеклоткань	0,42	0,37	-0,11
9	Зеленая эмаль	0,88	0,85	-0,04
10	Черная эмаль	1	1	0
11	<u>Иноксель</u> (поверхность полпирована)	0,47	0,46	-0,018
12	Окись кремния на алюминии	0,17	0,057	-0,66
13	Кварцевое стекло	0,012	0,010	-0,20

Хотя проанализированные покрытия и материалы не охватывают все их используемое в космической технике многообразие, все же представленные в

таблице результаты расчета спектральных погрешностей позволяют сделать некоторые выводы качественного характера относительно степени пригодности рассматриваемого источника для целей имитации солнечного излучения. Так погрешности в ряде случаев достаточно большие и чаще всего с отрицательным знаком. Это свидетельствует о том, что при проведении экспериментальных исследований плотность теплового потока от имитатора солнечного излучения поглощаемого наружной поверхностью космического аппарата будет меньше, чем в реальных условиях эксплуатации.

Данное обстоятельство является особенно неблагоприятным, потому что может ухудшаться естественным отличием поглощательной способности многих материалов и покрытий, относящихся к классу терморегулирующих, по отношению к излучению имитатора и излучению Солнца. В первую очередь основное отличие обусловлено деградацией покрытий под воздействием факторов космического пространства в условиях штатной эксплуатации, а в рамках наземного эксперимента деградация отсутствует. Таким образом необходима корректировка спектра дуговых ламп в направлении уменьшения доли энергии излучения в полосе спектра от 0,8 до 1,05 мкм.

Известны источники, спектр излучения которых имеет существенно лучшее приближение к солнечному, по сравнению с дуговыми ксеноновыми лампами. К ним можно отнести кварцевые дуговые лампы, наполненные парами ртути с добавками хлорида алюминия ( $AlCl_3$ ), ионида индия ( $InI_3$ ) и бромида олова.

При использовании таких ламп в качестве имитатора Солнца а тепловакуумной камере для испытаний космических аппаратов или его отдельных частей, вызывают трудности из-за небольшой мощности, а также из-за ограниченного ресурса работы, несмотря на то, что конструктивно эти лампы несильно отличаются от обычных ксеноновых ламп.

Заслуживают внимание и угольные дуговые источники. Практическое применение таких источников излучения имеют трудности, связанные с большим расходом положительного электрода, несмотря на то, что в видимой и инфракрасной области спектра они соответствуют спектру излучения Солнца.

### 1.3.3 Особенности известных имитаторов, выполненных по схеме Кассегрена

Экспериментальная установка с имитатором солнечного излучения (ИСИ), находящаяся в лаборатории реактивного движения NASA реализована по системе Кассегрена [19,24]. Тепловакуумная камера представляет собой вертикальный цилиндр высотой 14 м и диаметром 8 м, а основные элементы ИСИ смонтированы в десятиметровой надстройке (см. рисунок 1.5). Оптическая ось имитатора совпадает с вертикальной осью камеры. Источниками излучения в этом имитаторе служат ртутно-ксеноновые лампы мощностью 2,5 кВт, расположенные вне вакуумной камеры в надстройке на плоском или вогнутом щите. Каждая лампа, обозначенная позицией 1, устанавливается в фокусе отражателя 2 (ламповые модули). В результате излучение от модулей попадает на параболоидное зеркало 3 и далее отражается от него концентрируясь на псевдогиперболоидном выпуклом зеркале 4. После чего концентрированный пучок лучей проходит через входную линзу 5 и попадает на рассеивающее зеркало 6, отражающее лучи на главное параболоидное зеркало 7, которое и формирует малорасходящийся поток излучения нужной плотности.

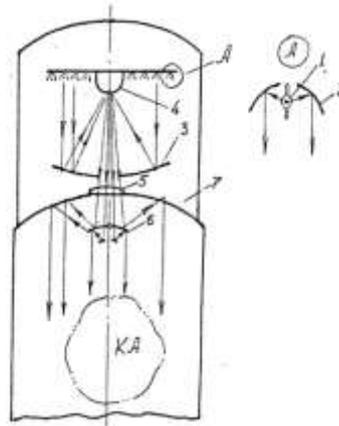


Рисунок 1.5 - Схема тепловакуумной установки лаборатории реактивного движения NASA

Основные параметры ИСИ [19,24]:

- сечение потока излучения плоскостью, перпендикулярной оси имитатора, представляет собой шестиугольник с диаметром вписанной окружности ориентировочно равным 6 м;
- пространственная неоднородность потока по сечению составляет  $\pm 15\%$ ;
- на 50% площади сечения угол непараллельности не превышает  $3^\circ$ , на остальной площади доходит до  $5^\circ$ .

С помощью пульта управления предусмотрена индивидуальная регулировка каждой лампы для освещения только своего участка в рабочей зоне. Также представляют интерес конструктивные элементы имитатора. Например, рассеивающее зеркало является фасеточным и каждая фасета отражает излучение на отдельную секцию большого внутреннего параболоидного зеркала, состоящего из 324 отдельных секций. Установка каждой секции осуществляется с помощью трех регулировочных винтов и охлаждается до  $T \approx 200$  К при помощи гибких металлических шин, обладающих большой теплопроводностью. Они связаны с трубопроводом, по которому проходит запитывание жидким или кипящим азотом.

У данного имитатора есть серьезные недостатки:

- переотражение на испытываемый объект части лучистого потока, который исходит из рабочей зоны установки и попадает на зеркала проекционной части имитатора;
- юстировка имитатора является весьма сложным и кропотливым делом и не всегда приводит к желаемому результату;
- имитатор имеет низкий КПД. С учетом потерь в электрических преобразователях энергии КПД лишь ненамного превышает 1%. Это связано с наличием большого числа оптических элементов. Возникают сложности и с охлаждением находящихся в вакуумной камере рассеивающих зеркал.

КПД имитатора повышается, конструкция существенно упрощается, а стоимость имитатора снижается, если система Кассегрена реализуется так, как она была реализована в имитаторе солнечного излучения (ИС-500) нашей отечественной установки ВК600/300 (рисунок 1.6.)

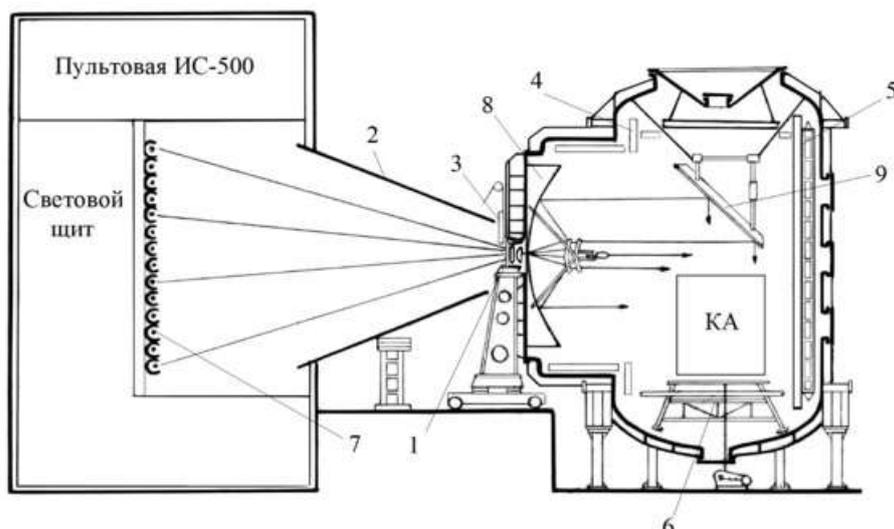


Рисунок 1.6 - Схема ИСИ установки ВК 600/300

1- входной блок, 2- светозащитный конус, 3- заслонка, 4- секционные экраны-шторки, 5- криогенные экраны, 6- опорно-поворотное устройство, 7- ламповый модуль, 8- осевая оптическая схема Кассегрена, 9- фасетное зеркало верхнего облучения

Оптическая ось имитатора – горизонтальная. Имитатор можно разделить на две части: осветительную и проекционную. Осветительная часть установлена за пределами вакуумной камеры и выполняется в виде щита 1 с установленными на нем ламповыми модулями 2 - прожекторами. Проекционная часть включает в себя входной блок и блок зеркал. В простейшем случае входной блок состоит из линзы 3, на плоскую поверхность которой наносится специальное покрытие, предназначенное для корректировки спектра излучения имитатора с тем, чтобы приблизить его к спектру излучения Солнца.

В блок зеркал входят основное параболическое (4) и вспомогательное эллипсоидное (5) проекционные зеркала, а также большое (6) и малое (7) рассеивающие обратные гиперболические зеркала.

Ламповые модули должны являться источником малорасходящегося и, по возможности, однородного (по сечению пучка) потока излучения, падающего на входную линзу. Выполнение этого условия является одной из предпосылок достижения качественной имитации потока солнечного излучения по

однородности и малой расходимости имитируемого потока. Однако из-за горизонтального расположения осветительной части имитатора электроды дуговых ламп в ламповых модулях рассматриваемого имитатора располагаются вертикально. В этом состоит основной недостаток данного имитатора. Он обусловлен тем, что не выполняется главное требование к относительному расположению источника излучения (лампы) и отражателя лампового модуля: электроды лампы должны располагаться на оптической оси отражателя. При подобном размещении лампы в отражателе затеняемость электрической дуги электродами минимальна, а главное изображение имитатора в зеркале отражателя. В этом случае является практически осесимметричным относительно оптической оси лампового модуля.

Если лампа в модуле располагается так, что ее электроды перпендикулярны оптической оси отражателя, то изображение дуги в зеркале отражателя имеет сложную и неблагоприятную для интегрирования форму. Это является следствием затенения дуги электродами лампы, несферичности геометрической формы дуги, а также неоднородности в распределении объемной плотности, выделяемой в дуговом разряде энергии.

Рассматриваемое требование к расположению дуговой ксеноновой лампы в отражателе лампового модуля накладывает заметные ограничения на возможные варианты конструкции имитатора солнечного излучения и тепловакуумной камеры в целом.

Эксплуатация дуговых ламп с ксеноновым наполнением в расположение, когда электроды находятся под небольшими к вертикали углами или вертикально, необходима из-за влияния гравитационных сил на геометрию электрической дуги, а также ее устойчивость. Таким образом, это обстоятельство характеризует наиболее предпочтительную, с точки зрения достижения большей точности моделирования излучения Солнца, расположение имитатора в составе тепловакуумной установки, именно такое его размещение, при котором реализуется вертикальное или близкое к вертикальному расположение оптической оси имитатора, что предопределяет формирование вертикального или близкого к

нему пучка излучения, в то время часто с эксплуатационной или конструктивной точек зрения преимущественнее является имитатор с горизонтальным пучком излучения.

Однако известен положительный опыт по эксплуатации ламп мощностью 20 - 32 кВт в сильно наклоненном, почти горизонтальном положении [53]. Положительный в том смысле, что без применения сложной системы магнитной стабилизации электрическая дуга в лампах, наклон которых по отношению к вертикальному положению доходит до  $80^\circ$  и более, отличалась стабильностью и по форме и по энергетическим параметрам в течение всего ресурса работы лампы.

#### **1.3.4 Примеры практического воплощения неосевой схемы солнечного имитатора**

Неосевые схемы имитатора солнечного излучения нашли практическое воплощение в имитаторах многих тепловакуумных установок. Заслуживает внимание имитатор, изображенный на рисунке 1.7 и входящий в состав введенной в эксплуатацию в 1982 г. тепловакуумной установки Европейского центра космических исследований и технологий.

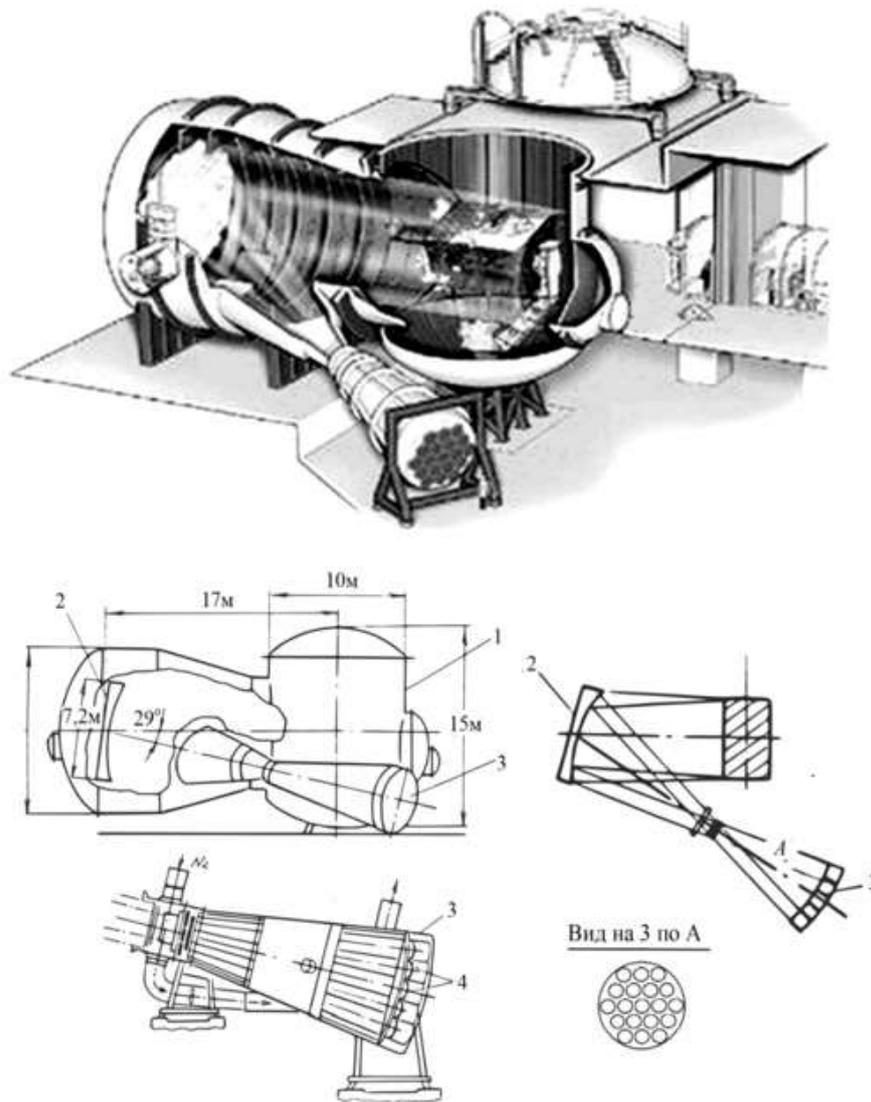


Рисунок 1.7 - Конструктивная и оптическая схема солнечного имитатора Европейского центра космических исследований и технологий  
 1 - вакуумная камера, 2 - проекционное зеркало, 3 - ламповый блок,  
 4 - ламповые сборки

ИСИ обладает большими размерами. Так, например, диаметр, имитируемого горизонтального пучка излучения составляет 6 м с точностью воспроизведения параметров потока излучения Солнца:

- угол непараллельности не превышает  $2^\circ$ ;
- неоднородность плотности потока солнечного излучения по сечению пучка  $\pm (2 - 4) \%$ .

В качестве источников излучения в имитаторе используются 19 дуговых ксеноновых ламп мощностью 20 кВт. Источники излучения, включенные в состав ламповых модулей, скомпонованы в ламповый блок, который находится за пределами вакуумной камеры. Оптические оси ламповых модулей, а вместе с ними и электроды дуговых ламп расположены под большими углами по отношению к вертикали ( $70^\circ - 88^\circ$ ), то есть некоторые лампы расположены практически горизонтально. Как отмечается в [37] при неблагоприятном расположении ламп, если рассматривать протекания физических процессов в лампе, никаких отрицательных последствий не наблюдается. Дуга горит устойчиво, форма электрической дуги явно не изменяется.

Еще одним примером реализации неосевой схемы ИСИ является камера ГВУ-600 ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва» (см. рисунок 1.8) [37].

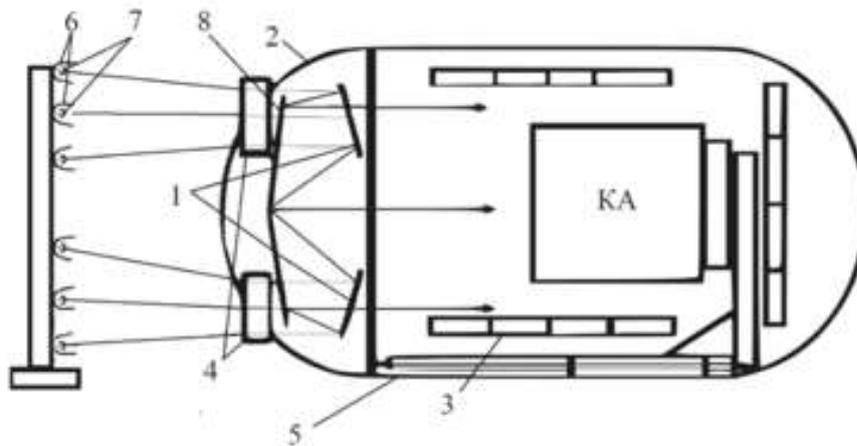


Рисунок 1.8 - Схема ИСИ ГВУ-600

1 - зеркальный смеситель, 2 - крышка камеры, 3 - криогенные экраны, 4 - входные иллюминаторы, 5 - корпус камеры, 6 - лампы с эллипсоидными рефлекторами, 7 - вспомогательные сферические зеркала, 8 - параболический коллимирующий отражатель

Площадь имитируемого солнечного пятна, формируемого ИСИ ГВУ-600 –  $25 \text{ м}^2$  (с неравномерностью не более 15%).

Источниками излучения ИСИ являются четыре световых щита, каждый из которых состоит из 30 дуговых ксеноновых ламп, установленных в отражатели. Поток излучения ламповых модулей вводится в объем вакуумной камеры через четыре оптических охлаждаемых ввода, устроенных в корпусе откатной крышки. Пройдя через вводы, потоки излучения попадают на систему зеркал, суммирующих их в единый малорасходящийся поток, направляемый на КА. Зеркала и система фокусировки занимают примерно 4 м в вакуумной камере. На внутренней поверхности задней и передней крышек на цилиндрической обечайке закреплены секционированные азотные криогенные экраны с регулируемым потоком и температурой циркулирующего через них жидкого азота. Высоковакуумная откачная система включает в себя турбомолекулярные и криогенные насосы.

## **1.4 Моделирование воздействия на КА исходящего от планет излучения**

### **1.4.1 Особенности полей теплового излучения планет и анализ перспектив их физической реализации**

Результаты наземных и спутниковых измерений и расчетно-технических исследований свидетельствует о весьма изменчивом характере полей излучения планет на высотах, представляющих интерес в связи с задачей обеспечения теплового режима КА. Наблюдается зависимость, часто весьма существенная, интенсивности и спектрального состава приходящего от планет излучения от направления и времени [7,17,24]. Это связано с тем, что характеристики поля излучения зависят от множества факторов, в том числе от случайных, например, таких как состояние атмосферы, если она имеется, вид подстилающей поверхности, зенитный угол Солнца, особенность макрорельефа поверхности. Поэтому физические и математические модели, претендующие на высокоточное соответствие реальным полям излучения планет, очевидно, могут быть только весьма сложными и не могут иметь надежных количественных характеристик. Широкая неопределенность в значении и характере зависимости от направления и

длины волны излучения радиационных характеристик планет, с одной стороны, и чрезвычайная, неоправданная целью сложность учета направленных излучательных и отражательных характеристик планет, с другой стороны, явились причиной того, что для расчета и экспериментального моделирования падающего на космический аппарат излучения используются идеальные диффузные модели планет, основанные на осреднении радиационных характеристик или по всей ее поверхности, или по той ее части, которая в данный момент участвует в облучении КА [14,17,19]. При этом входящее от планет излучение разделяют на две составляющие: собственное (инфракрасное длинноволновое) и отраженное солнечное (коротковолновое) излучение.

В рамках диффузной модели вводится еще ряд предположений, касающихся вопросов распределения по поверхности величины плотности потоков собственного и отраженного солнечного излучения и спектрального состава излучения. Плотность потока отраженного от элемента поверхности планеты солнечного излучения, а также плотность собственного излучения не имеющих атмосфер планет принимается пропорциональной плотности падающего на рассматриваемый элемент солнечного излучения, т.е. пропорциональной косинусу зенитного угла Солнца. Для планет, имеющих атмосферы, плотность собственного излучения принимается постоянной по всей поверхности, как, например, для Земли и Венеры, или переменной, изменяющейся на освещенной Солнцем стороне по линейному в зависимости от  $\cos\gamma_s$  закону, как в случае Марса, Луны, Меркурия. Очевидно, что при постоянной по поверхности плотности входящего от планеты потока излучения поле интенсивности излучения в пределах телесного угла обзора планеты будет изотропным, а во всех других отмеченных случаях - анизотропным.

Спектр собственного излучения планет принимается подобным спектру излучения абсолютно черного тела с температурой, равной средней радиационной температуре рассматриваемой области планеты, а спектральный состав отраженного от планет солнечного излучения принимается таким же, как и спектральный состав прямого потока теплового излучения Солнца.

Введение отмеченных диффузных моделей планет с осредненными в той или иной степени радиационными характеристиками позволяет составить сравнительно простые математические модели облученности КА потоками собственного и отраженного солнечного излучения планет [14,17].

При использовании изотропной модели предполагается, что локальная по поверхности плотность исходящего от планеты потока излучения (величина  $E$ ) одинакова для всех видимых с орбиты участков поверхности. В случае анизотропной модели величина  $E$  на освещенной Солнцем стороне планеты пропорциональна косинусу зенитного угла Солнца для каждого элемента поверхности – то есть пропорциональна косинусу угла  $\gamma_s$  между направлениями на рассматриваемый элемент и на Солнце из центра планеты. Сказанное иллюстрируется на рисунке 1.9, где кривая 1 характеризует эпюру распределения величины  $E$  по поверхности планеты для изотропной, а кривая 2 - для анизотропной модели.

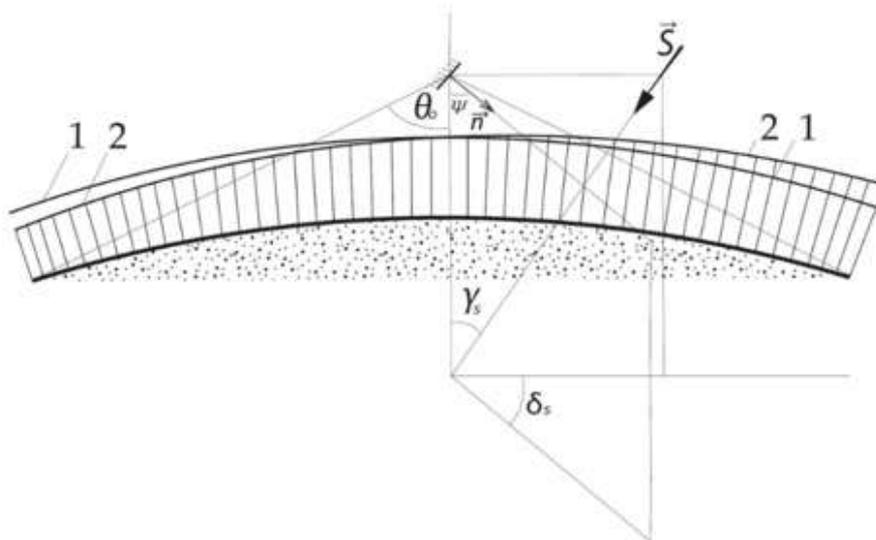


Рисунок 1.9 - Распределение по поверхности планеты плотности исходящего излучения для изотропной (кривая 1) и анизотропной (кривая 2) модели поля интенсивности излучения планеты

В силу отличия реальных направленных излучательных характеристик поверхности планеты от положенных в основу математической модели диффузных ее характеристик в ряде случаев возможно появление существенных погрешностей в расчетной величине плотности падающего на элементы КА потока излучения от

планет [14,17,19]. Однако, как отмечается в работе [24], можно задать, не выходя за рамки диффузных моделей, такие крайние значения интенсивности исходящего от планеты излучения, что для всех элементов исследуемого КА обеспечивается определение максимально и минимально возможных тепловых потоков.

#### **1.4.2 Погрешности моделирования теплового воздействия планет на поверхность космического аппарата при замене анизотропной модели поля интенсивности их излучения изотропной**

Для математического моделирования теплового воздействия на космический аппарат (КА) исходящего от планет излучения используются в зависимости от особенностей планет изотропная и анизотропная модели поля интенсивности их излучения. В основе изотропной модели лежит предположение о том, что локальная по поверхности плотность исходящего потока излучения одинакова для всех видимых с орбиты участков поверхности. В случае анизотропной модели эта величина на освещенной Солнцем стороне планеты принимается пропорциональной косинусу зенитного угла Солнца для каждого элемента поверхности. Известные по литературным источникам результаты исследований по проблеме создания имитаторов поля излучения планет свидетельствуют о том, что в тепловакуумных установках с рабочим объемом, соизмеримым с объемом самой установки, возможно лишь воспроизведение изотропной модели поля интенсивности излучения планет. В связи с этим актуальным является вопрос о возможности и условиях замены анизотропной модели изотропной моделью при физическом моделировании воздействия на КА отраженного от планеты солнечного излучения и потока собственного излучения не имеющих атмосферу планет. Проведенное в работе [24] исследование по этому вопросу базируется на сравнении результатов расчета облученности элементов КА с использованием сопоставляемых моделей. На основании результатов расчета в работе сделан вывод о возможности экспериментального моделирования воздействия отраженного от планет потока солнечного излучения и потока собственного (инфракрасного)

излучения не имеющих атмосферу планет с помощью имитаторов, в рабочем объеме которых воспроизводится изотропное поле излучения.

Обычно, говоря о влиянии исходящего от планет излучения на тепловое состояние КА, подразумевают под термином «планета» не только планеты Солнечной системы, но и крупные естественные спутники самих планет: Луну, Фобос, Деймос и т.п. [1-4]. Исходящее от этих небесных тел излучение, можно условно разбить на две составляющие: отраженное солнечное излучение и собственное инфракрасное, источником которого в основном является поглощаемая солнечная радиация. Для целей математического и физического моделирования влияния этого излучения на тепловой режим околопланетных КА используют упрощенные модели планет, в том числе основанные на предположении о диффузном характере исходящего от планеты излучения и осреднении радиационных характеристик их поверхности [17,19,20]. Эти модели весьма приближенно описывают локальные (в пространстве и времени) радиационные ситуации на околопланетных орбитах, но, тем не менее, они представляются приемлемыми и целесообразными в связи со следующими обстоятельствами:

1) Имеет место широкая неопределенность в характере зависимости от направления и времени локальных радиационных характеристик планет;

2) Тепловая инерционность наружных элементов КА в большинстве случаев настолько значительна, что позволяет не учитывать нерегулярный характер изменения радиационных характеристик поверхности планет;

3) Иерархическое положение системы обеспечения теплового режима, является весьма высоким, поэтому результаты расчетов и особенно экспериментов должны отличаться высокой надежностью. Применяемые модели планет привлекательны в силу своей простоты, и в тоже время в рамках этих моделей можно задать в расчете или эксперименте такие крайние значения интенсивности исходящего от планеты излучения, что для всех элементов КА обеспечивается моделирование максимально и минимально возможных тепловых нагрузок, источником которых является излучение планеты.

### **1.4.3 Современная концепция экспериментального моделирования теплового воздействия планет на КА**

Судя по литературным источникам [19,24] в первые десятилетия развития практической космонавтики велись интенсивные проектные и опытно-конструкторские работы по созданию имитатора изотропной модели поля излучения планет. Были разработаны оригинальные и приемлемые по точности и конструктивной реализации принципиальные схемы имитаторов, однако их недостатком являлась чрезмерная громоздкость, большая масса и плохая совместимость их работы в совокупности с имитатором Солнца, особенно в тех случаях, когда взаимная ориентация полей излучения Солнца и планеты в процессе проведения тепловакуумных испытаний должна была изменяться по времени. Кроме того, возникло еще одно обстоятельство, которое задачу создания имитатора поля излучения планет вывело из разряда важнейших. Появление крупногабаритных КА, в частности многомодульных, потребовало дооснащения экспериментальных установок дополнительными источниками излучения, которые должны воспроизводить тепловые нагрузки от тех частей КА, которые не вошли в состав испытуемого объекта в основном по причине ограниченности размеров экспериментальных установок. В связи с этими обстоятельствами в настоящее время тепловое воздействие планет на космические аппараты моделируют с помощью упрощенных средств, при использовании которых поле излучения планеты по основным своим параметрам не воспроизводится, а воспроизводятся лишь расчетные значения внешних тепловых нагрузок, полученные с помощью математических моделей внешнего теплообмена КА. Применяют системы излучателей различные по конструкции и по способу подвода энергии: нагреваемые электрическим током ленты, полые керамические стержни с вмонтированными в них электронагревателями, сетчатые нагреватели, лампы накаливания, например, галогенные, излучающие панели [36]

## 1.5 Основные требования к конструкции и излучающим элементам инфракрасных имитаторов

1) Элементы инфракрасного имитатора, как конструктивные, так и радиационные, не должны в заметной степени затенять криогенные экраны экспериментальной установки от излучения, исходящего от испытуемого объекта, а также от имитационных систем самой экспериментальной установки, в частности, от самого инфракрасного имитатора.

При несоблюдении этого условия возникают следующие нежелательные явления, приводящие к погрешностям определения теплового состояния испытуемого объекта:

- Появляется поток фонового излучения из-за переизлучения и переотражения потока падающего на элементы имитатора излучения, исходящего от поверхности испытуемого объекта и от имитационных систем экспериментальной установки в том числе и от самого инфракрасного имитатора.

- Ухудшается качество моделирования радиационных свойств космического пространства, называемых «чернотой» и «холодом» космического пространства.

- Ухудшается качество моделирования космического вакуума и идеальных поглощательных свойств космического пространства по отношению к частицам газа, покидающим КА.

2) Спектр исходящего от имитатора излучения должен, по возможности, соответствовать спектру излучения серого тела, в идеале - черного.

3) Температура излучающих элементов имитатора должна быть как можно ниже, но при условии моделирования на поверхности испытуемого объекта тепловых потоков нужной плотности.

Требования 1 и 3 являются противоречивыми, потому что желание удовлетворить первому условию приводит к необходимости размещения излучающих элементов имитатора с определенной и довольно значительной дискретностью, а это влечет за собой необходимость повышения температуры излучающих элементов по мере увеличения степени дискретности.

## **Глава 2. Известные средства приближенного моделирования внешних тепловых нагрузок на поверхность КА**

### **2.1 Инфракрасные имитаторы модульного типа с ленточными излучателями**

Имитаторы выполняются в виде совокупности линейчатых модулей, располагающихся чаще всего вдоль образующих поверхности кругового цилиндра и на торцевых панелях ферменной конструкции.

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

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

Для уменьшения нагрузки на криогенную систему экспериментальной установки применяются отражатели и теплоизоляция. Основной целью их применения является повышение коэффициента полезного использования подводимой к имитатору энергии. При этом геометрическая форма отражателей будет определяется в основном типом излучателя, технологическими, производственными возможностями реализации, а также некоторыми аспектами методического характера. Основной задачей при разработке отражателей является стремление не ухудшать качество моделирования радиационных свойств космического пространства. К отражателям не предъявляются особые требования по формированию индикатрис излучения, отличающихся от диффузных, хотя с экономической точки зрения предпочтительны отражатели, которые позволяют обеспечить излучение 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. На практике при эксплуатации имитаторов Однако практика эксплуатации имитаторов модульного типа с ленточными излучателями показывает, что отражатели с площадью выходного сечения, в несколько раз превышающие площадь поверхности излучателя, приводят к появлению в установке в ряде случаев потоков фонового излучения с недопустимо большой плотностью. Поэтому в таких случаях целесообразней использовать ЭВТИ, экранирующую излучатель с тыльной стороны для уменьшения потерь энергии, а не применять отражатель. Для и разработано эффективное методическое обеспечение их эксплуатации.

Имитаторы с ленточными излучателями на основе графитовых материалов 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 компоновющиеся в конструкции имитатора.

Однако использование этих ламп затруднено из-за недостаточной изученности вопросов, связанных с методикой определения энергетического режима работы ламп, входящих в состав имитатора. Лампы можно рассматривать как условно линейчатые излучатели и для выбора режима их работы можно использовать

отдельные фрагменты известных методических подходов, но в данном случае имеет место существенные и неблагоприятные различия в решении задачи расчета плотности поглощаемого элементами испытываемого объекта потока излучения. Например, спектр исходящего от лампы излучения может существенно отличаться от спектра излучения серого тела, поскольку излучение лампы состоит из излучения, формирующегося системой «спираль – газ - кварцевая колба». Также различия могут быть обусловлены тем, что в ламповом имитаторе геометрическая форма излучателя и индикатриса его излучения другие, чем в имитаторе с плоскими ленточными излучателями.

## **2.2 Имитатор на основе трубчатых ламп накаливания**

Конструктивно имитатор выполняется в виде, по возможности, прозрачного каркаса, на котором установлены трубчатые лампы автономно или определенными группами, запитываемые электрическим током. Возникающая задача управления таким имитатором, в значительной степени подобна задаче управления имитатором с ленточными излучателями. Отличие заключается в методике и алгоритме расчета теплообмена между ламповыми модулями и тепловоспринимающими элементами испытываемого объекта. Причем задача расчета усложняется при объединении нескольких ламп в целые блоки.

Для рассматриваемого имитатора важной 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. Первая часть общей задачи подробно рассматривается в работе [32].

Используемый в этих работах методический подход основан на замене элементарных по длине участков цилиндрического излучателя плоскими элементарными площадками, геометрические характеристики которых зависят от

взаимного положения и ориентации элемента цилиндрического излучателя и тепловоспринимающего элемента.

Возможность такой замены обусловлена тем обстоятельством, что диаметр излучателя намного меньше расстояния до тепловоспринимающего элемента. Вследствие этого лучи, исходящие из точек излучающего элемента в направлении тепловоспринимающей площадки, можно считать параллельными. Так при  $d/\rho = 0.05$  угол расходимости лучей не превышает  $3^\circ$ . Исходя из этого можно сделать вывод о возможности замены цилиндрических элементов плоскими с ориентацией, изменяющейся в зависимости от взаимного расположения тепловоспринимающего элемента и элемента лампы. В результате это позволит упростить решение задачи определения угловых коэффициентов между лампами и элементами испытываемого объекта. Схема замены цилиндрического излучателя совокупностью особо ориентированных плоских элементов проиллюстрирована на приведенном ниже рисунке 2.1.

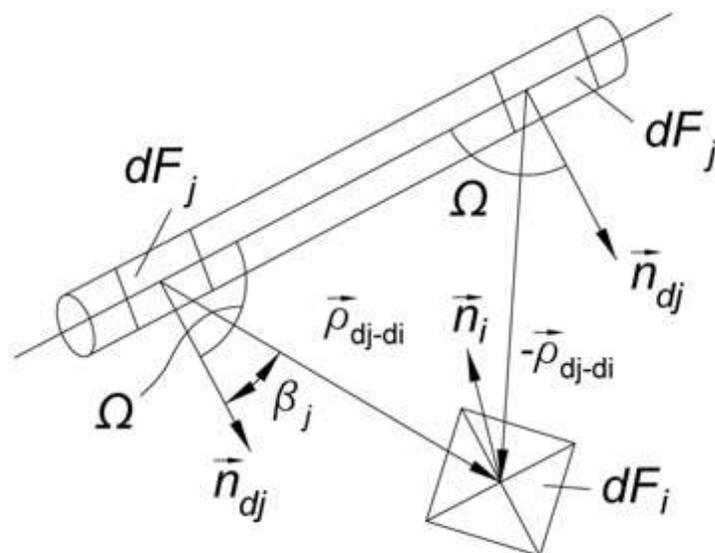


Рисунок 2.1 - Иллюстрация принципа замены участка трубчатой кварцевой лампы плоским элементом

Что касается определения поглощаемого тепловоспринимающими элементами падающего от цилиндрического излучателя потока излучения, то здесь необходимо отметить следующее:

- Если поверхность испытуемого объекта является серой, то плотность поглощаемого потока излучения будет прямо пропорциональна плотности падающего излучения, является очевидным.

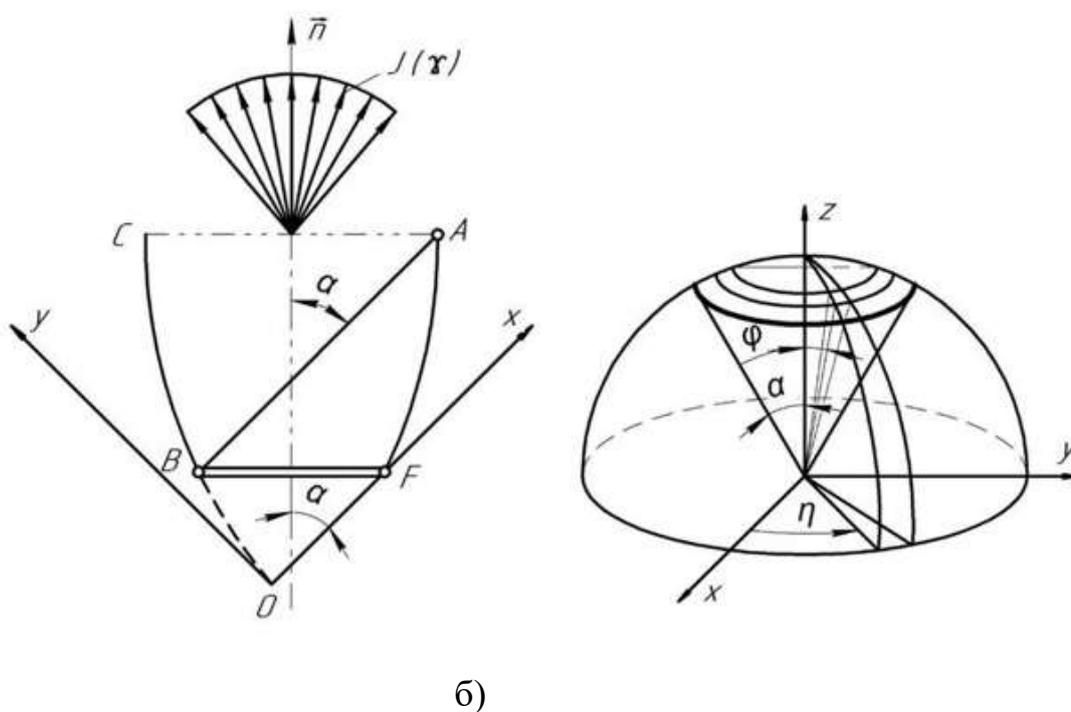
- Если поверхность испытуемого объекта является несерой, то расчет плотности поглощаемого потока излучения чрезвычайно усложняется, особенно, если спектральные радиационные характеристики излучателя зависят от длины волны излучения, как, например, у галогенных ламп накаливания.

Следует отметить, что неизвестно о существовании инженерной методики, реализованной в апробированной компьютерной программе, позволяющей определять оптимальный режим работы имитатора на основе ламп накаливания, подобных галогенным.

### **2.3 Инфракрасные имитаторы модульного типа с условно точечными излучателями**

В основном, как отмечалось ранее, в крупных тепловакуумных установках применяются инфракрасные имитаторы с условно линейчатыми излучателями, но такой тип излучателей не всегда является оптимальным выбором, тем самым, сужая область эффективного применения ИКИ. На помощь могли бы прийти имитаторы с условно точечными излучателями, так как в ряде случаев имеют достаточные преимущества особенно, когда объект испытаний имеет сложную конфигурацию поверхности. Задача по проектированию и созданию инфракрасного имитатора с условно точечными излучателями является актуальной особенно если использовать широко применяемые и удобные в эксплуатации источники энергии, объединенных в сборочные модули, испускающих в сторону изделия излучение в инфракрасной полосе спектра. В связи с этим представляется

перспективной принципиальная схема модуля имитатора, описанная в статье [62]. В данной работе излагаются метод формирования потоков излучения с направленной силой, характеризуемой ламбертовской индикатрисой, ограниченной коническим телесным углом. Принципиальная схема модуля схематично изображенная на рисунке 2.2, представляет собой излучающую систему, состоящую из диффузно излучающего диска с диаметром  $d$  и параболоидного зеркального отражателя. Образующей линией поверхности зеркала является парабола с фокусом, совпадающим с наиболее удаленной точкой диска и с осью, параллельной прямой, где  $A$  - край зеркала, а  $B$  - точка излучателя, диаметрально противоположная точке  $F$ .



а) б)  
Рисунок 2.2 - Оптическая и расчетная схема системы с диффузным излучателем а) и зеркальным отражателем б), имеющим форму поверхности параболоида вращения

В отмеченной работе [62] показано, что данная излучающая система формирует лучистый поток, распространяющийся с одинаковой интенсивностью в пределах конического телесного угла  $\omega$  с углом полураствора  $\alpha$ .

Используя каноническое уравнение параболы и расчетную схему, приведенную на рисунке 2.3, можно выразить основные геометрические параметры рассматриваемой системы через  $d$  и  $\alpha$ :

$$D = \frac{d}{\sin \alpha}, \quad h = \frac{d \cdot (1 + \sin \alpha)}{2 \sin^2 \alpha}, \quad P = d \cdot (1 + \sin \alpha) \quad (2.1)$$

где  $p$  - параметр параболы.

Данная оптическая система испускает энергию излучения только в пределах телесного угла  $\omega$  и с постоянной интенсивностью, равной интенсивности излучения диффузного источника (при условии, если отражательная способность параболоидного зеркала равна 1).

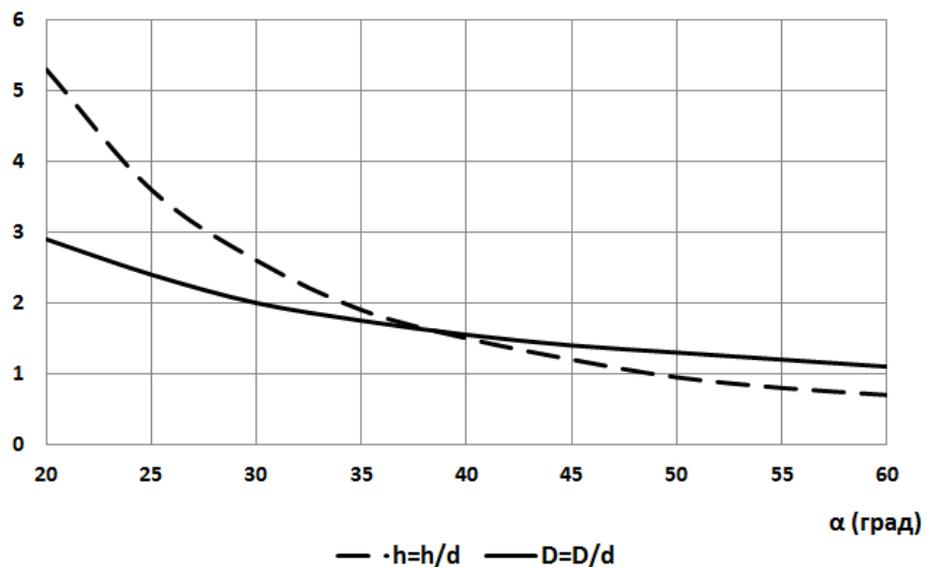


Рисунок 2.3 - Зависимость относительных размеров поперечного сечения системы с диффузным излучателем и зеркальным параболоидным отражателем ( $\bar{h} = h/d; \bar{D} = D/d$ ) от предельного угла  $\alpha$  выхода излучения из полости модуля,  $d$  - диаметр излучателя,  $h$  и  $D$  - соответственно высота и диаметр выходного сечения отражателя

## 2.4 Термозкраны

Судя по литературным источникам [36,56,61], возрастает интерес к термобарокамерам, оснащенным специальными термозкранами, на поверхности

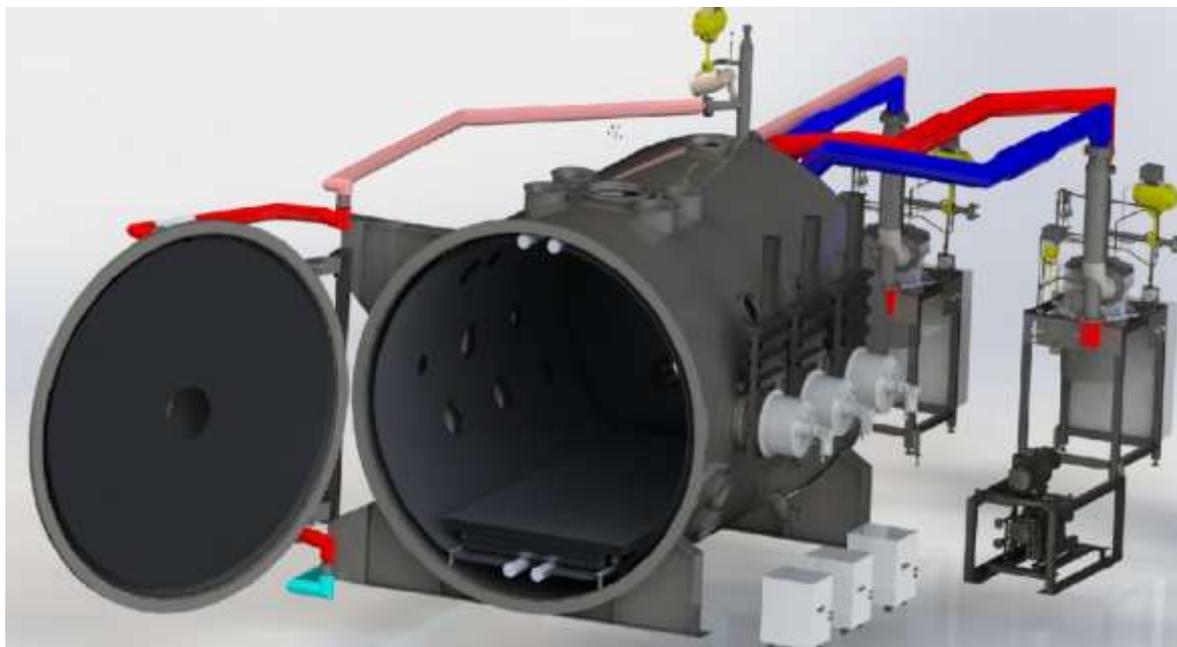
которых может устанавливаться температура в диапазоне от  $T_{\min}$  до  $T_{\max}$ . Обычно  $T_{\min} \in (-180^{\circ}\text{C}; -130^{\circ}\text{C})$ ,  $T_{\max} \approx 150^{\circ}\text{C}$ . Поддержание температур на экранах в заданном осуществляется с помощью агрегатов термостатирования газообразного азота (TCU - Thermal Conditioning Units) рисунок 2.4 а.

В состав системы охлаждения/нагрева включает в себя:

- Охлаждающие контуры с газообразным азотом;
- Подогреватели;
- Термоизолированные нагнетатели газообразного азота.

Не выполняя в вакуумной камере функции насосов основной откачки (насосов криоконденсационного типа), эти экраны предназначены в основном либо для термостатирования объекта при определенном уровне температур, либо для приближенного моделирования тепловых нагрузок на поверхность изделия.

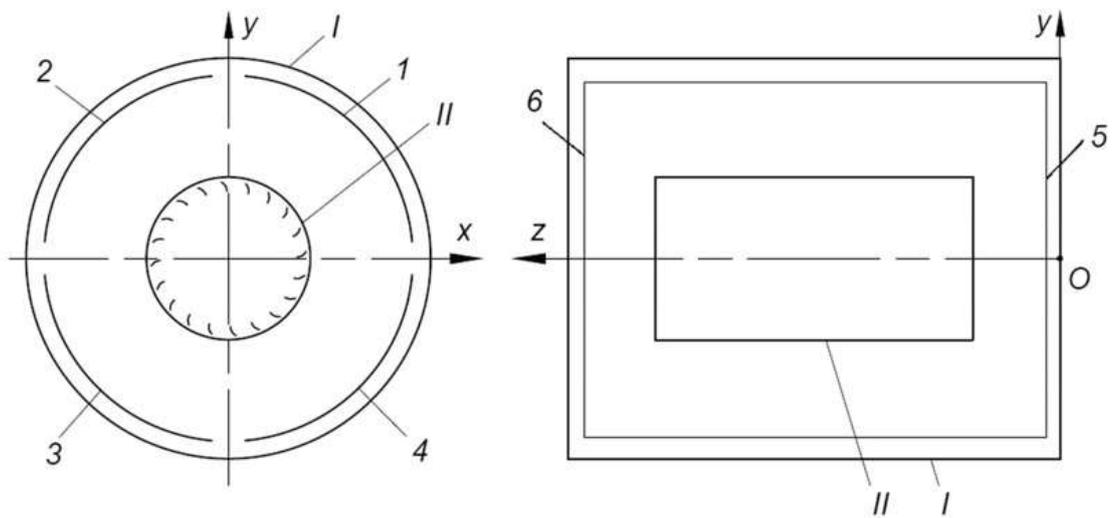
3d-модель, экспериментальная установка и схема приведена на рисунке 2.4 (а, б, в) соответственно. Схема представлена с четырьмя термоэкранами.



а)



б)



в)

Рисунок 2.4 – Термовакуумная камера с термоэкранами  
 а) 3d- модель, б) экспериментальная установка, в) схема размещения  
 испытуемого объекта II в термобарокамере I с четырьмя боковыми (1,2,3,4) и  
 двумя торцевыми (5,6) термоэкранами.

## 2.5 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 размещены в какой-то упорядоченной форме система галогенных ламп накаливания. На рисунке 2.5 изображена схема расположения галогенных ламп накаливания, заимствованная из технического описания известной термовакуумной установки CLIMATS [45].

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.



Рисунок 2.5 – Экспериментальная установка с размещением галогенных ламп накаливания

## 2.6 Сетчатые излучатели

Излучатели 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. Они представляют собой совокупность параллельно расположенных и последовательно запитываемых электрическим током проводов из нихрома. Провода натягиваются на рамки, выполненные из неэлектропроводного материала, например, стеклотекстолита. При этом диаметр проводов по крайней мере в десять раз меньше расстояния между соседними проводами. Сетчатый имитатор представлен на рисунке 2.6.



Рисунок 2.6 - Сетчатый излучатель

Достоинством данного способа моделирования внешнего теплового воздействия является то, что такие излучатели не изменяют теплофизические и радиационные свойства облучаемой поверхности и в незначительной степени экранирует 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 электронагревателей, каждый из которых оказывал 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.

## **2.7. Поверхностные управляемые электронагреватели**

В некоторых случаях для моделирования тепловых нагрузок на поверхность испытываемого объекта используют поверхностные, пленочные электронагреватели, тепловые одеяла, а также нагревательные рубашками [19,24]. Для этого внешнюю поверхность испытываемого объекта условно делят на ряд характерных частей, на каждой из которых внешние тепловые условия можно считать одинаковыми на поверхности и в выбранных областях, в зависимости от конструктивных особенностей нагревателей, используют следующие методы воспроизведения расчетных внешних тепловых потоков:

- На внешней поверхности секций электронагревателей предусмотрены те же значения степени черноты, что и на поверхности соответствующей части космического аппарата, на которой установлены эти нагреватели, чаще всего приклеенные. Электрическая мощность, подаваемая на нагреватель, соответствует величине внешнего теплового потока, поглощаемого этим участком поверхности космического аппарата;

- С помощью поверхностных электронагревателей воспроизводятся расчетные значения температуры наружного воздуха;
- Электронагреватели устанавливаются под теплоизоляцией на корпусе изделия и с их помощью воспроизводятся расчетные значения тепловых потоков к соответствующим элементам корпуса космического аппарата. Последний способ используется только в тех случаях, когда установка электронагревателей на внешней поверхности теплоизоляции космического аппарата затруднена, а также когда космический аппарат имеет множество удаленных блоков, смонтированных блоков, соединенных в тепловом отношении с корпусом испытуемого объекта.

Рассмотренные нагреватели нашли применение в практике тепловых испытаний космических аппаратов, благодаря ряду присущих им положительных качеств:

- нагреватели могут быть использованы для проведения тепловакуумных испытаний космических аппаратов с небольшими относительными размерами экспериментальной установки
- нагреватели являются хорошо управляемым экономичным источником тепловой энергии, поэтому с их помощью можно воспроизвести тепловой эффект источников лучистой энергии в космосе даже для космических аппаратов, совершающих произвольные угловые перемещения относительно последних.

Однако рассматриваемый метод воспроизведения расчетных внешних тепловых потоков имеет очень серьезные недостатки, ограничивающие сферу его применения. Основными из них являются следующие [42]:

- Система управления питанием, подаваемым на электронагреватели, сложна и громоздка. [47,48].
- Для каждого космического аппарата необходимо спроектировать и изготовить секции электронагревателей, а затем произвести относительно длительную подготовку объекта к испытаниям;

- С помощью электронагревателей часто не удается с должной точностью воспроизвести расчетные значения внешнего теплового потока к элементам космического аппарата, на которых затруднена установка нагревателей;
- Во многих случаях теплофизические характеристики элементов космического аппарата, на которых установлены электронагреватели, существенно изменяются.

### **Выводы по главам 1 и 2**

Задача моделирования внешних условий теплообмена КА с высокой точностью в наземной экспериментальной установке, охватывающая все классы околопланетных аппаратов очень сложна не только в техническом плане, но и при разработке методических подходов. В первую очередь проблемы связаны с тем, что во многих случаях возникает необходимость реализации в экспериментальных установках, нестационарных во времени и пространстве полей излучения, формируемых одновременно как Солнцем, так и планетой (чаще всего Землей). В связи с этим большое значение имеют приближенные методы моделирования внешнего теплообмена космического аппарата с использованием источников инфракрасного излучения.

## **Глава 3. Исследование методов оптимизации энергетических режимов работы инфракрасных имитаторов**

### **3.1 Методы оптимизации режимов работы инфракрасных 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. В основном такие имитаторы не воспроизводят параметры поля излучения естественных источников. С их помощью можно моделировать лишь расчетные значения внешних тепловых нагрузок. При этом возникает сложная задача управления энергетическими характеристиками ИКИ, т.е. необходимо определить и реализовать такие режимы эксплуатации, при которых расчетные внешние тепловые нагрузки воспроизводились бы наилучшим образом, в рамках применяемой инфракрасной излучающей системы.

Кратко рассмотрим известные методы решения вышеуказанной задачи [23,24,25] и сопоставим результаты их реализации, а также, на основе анализа ответим на вопрос о единственности полученного решения.

#### **3.1.1 Экстремальный метод оптимизации**

Метод был 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 подготовке проведения комплексных электрических испытаний КА.

Энергетический режим работы ИКИ характеризовался совокупностью значений интенсивности излучения его элементов в направлении своих нормалей, т.е. величинами  $J_j(0)$   $j = 1..n$ , где  $n$  - число излучателей. Выбор интенсивности

излучения был обусловлен тем, что эти величины являются выходными функциями излучающих модулей и зависят не только от подводимой мощности, конструкции этих модулей, но и от радиационных характеристик их отражающих поверхностей (при наличии отражателей), а также режима работы вакуумной и криогенной систем установки. Контроль величин интенсивностей излучения является очень сложной технической задачей, поэтому делался акцент на определении связи между  $J_i(0)$  и другими проще контролируруемыми параметрами ИКИ.

В основу программно-методического обеспечения закладывались геометрические модели изделия и ИКИ, а также информация о спектральных и интегральных радиационных характеристиках элементов наружной поверхности объекта и излучателей имитатора. Геометрическая модель имитатора представляла собой набор данных о координатах и ориентации его излучателей в связанной системе координат хуз с имитатором. Геометрическую модель изделия могла задаваться одним из следующих способов:

- Задавались координаты и ориентация большого числа элементарных площадок поверхности испытываемого объекта в системе координат хуз, которая введена для задания геометрической модели имитатора.
- Поверхность испытываемого объекта рассматривалась как совокупность поверхностей с однородными радиационно-оптическими характеристиками их элементов. На каждой выделенной поверхности в связанной с испытываемым объектом системе координат задавались прямоугольные координаты определенного количества точек. После чего осуществлялась аппроксимация каждой из однородных поверхностей многогранными поверхностями с треугольными гранями и определялись ориентация нормалей, координаты центральных точек и площади каждой грани. Затем геометрические характеристики элементов аппроксимирующих многогранных поверхностей преобразуются в систему координат хуз, связанную с экранами [33].

Учитывая эти обстоятельства 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  $\psi$ , представляющей собой сумму квадратов «взвешенных» погрешностей  $\Delta q_i$  воспроизведения расчетных значений  $q_i^0$  внешних тепловых потоков к выделенным тепловоспринимающим элементам. Величина  $\Delta q_i$  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  $q_i = \sum_{j=1}^n \pi \cdot A_{di-j} \cdot \Phi(\vec{r}) \cdot \varphi_{di-j} \cdot J_j(0)$ , где  $A_{di-j}$  - интегральная поглощательная способность  $i$ -го элемента по отношению к излучению  $j$ -го излучателя;  $\varphi_{di-j}$  - 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  $\psi$ , являющейся функцией  $n$  переменных  $J_1(0), J_2(0), \dots, J_n(0)$  определяется следующим выражением:

$$\psi(J_1(0), J_2(0), \dots, J_n(0)) = \sum_{i=1}^N b_i^2 \left( \sum_{j=1}^n \pi \cdot A_{ij} \cdot \varphi_{di-j} \cdot \Phi(\vec{r}) \cdot J_j(0) - q_i^0 \right)^2 \quad (3.1)$$

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

$$J_j(0) \geq 0, \quad J_j(0) \leq J_{MAX} \quad (3.2)$$

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 (3.2) 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]. При решении обратных 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.

### 3.1.2 Градиентные методы оптимизации

Второй подход к решению задачи определения оптимального режима работы инфракрасных имитаторов основан на использовании градиентных методов минимизации целевой функции  $\psi$ , 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

$$\psi'(J(0)) = \left( \frac{\partial \psi}{\partial J_1(0)}; \frac{\partial \psi}{\partial J_2(0)}; \dots \frac{\partial \psi}{\partial J_n(0)} \right)$$

$$\text{При этом } \frac{\partial \psi}{\partial J_k(0)} = 2\pi \cdot \sum_{i=1}^N A_{di-k} \cdot \varphi_{di-k} \cdot \left( \sum_{j=1}^n \pi \cdot A_{di-j} \cdot \varphi_{di-j} \cdot J_j(0) - q_i \right)$$

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  $\psi$  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:

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

### 3.1.3 Результаты сравнения рассмотренных методов

Методы градиентного типа, а также экстремальный метод оптимизации вектора  $J(0)$  в работе [27] 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  $7,5^\circ$ . 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 [42]. 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 используемой в космической технике.

Абсолютные погрешности  $\Delta q$  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  $460 \text{ Вт/м}^2$ . Что касается упомянутого выше ограничения по величине максимально допустимой интенсивности излучения модулей имитатора  $J_{MAX}$ , то она принималась равной  $16000 \frac{\text{вт}}{\text{м}^2 \text{стерад}}$ , исходя из значения максимально допустимой температуры излучателя  $T \leq 970 \text{ К}$ .

При сравнении результатов вычислительных экспериментов в статье [27] 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 %.

В результате анализа известных методов можно сделать вывод о том, что градиентные методы оптимизации и экстремальный метод дают практически одинаковые результаты по точности моделирования расчетных тепловых нагрузок. К тому же значения минимумов целевой функции для трех анализируемых методов мало отличаются друг от друга, но точки минимума отличаются существенно. Данное обстоятельство говорит об отсутствии единственности решения в рассматриваемой задаче, что свидетельствует о наличии у целевой функции неединственного минимума.

Одной из особенностей решаемой задачи является то, что коэффициенты  $A_{i,j}$ , входящие в выражение для целевой функции, зависят не только от характера распределения по  $\lambda$  спектральной поглощательной способности  $A_\lambda$  покрытий тепловоспринимающих элементов, но и характера распределения по  $\lambda$  спектральной интенсивности излучения  $J_\lambda$  каждого  $j$  - го модуля имитатора. Заметим, что  $J_\lambda = f(\lambda, T, \varepsilon_\lambda)$ , где  $\varepsilon_\lambda$  - спектральная степень черноты излучателя модуля,  $T$  - его температура. Поскольку значения  $J_j(0)$  могут быть самыми

различными, то для покрытий, не являющихся серыми, будут отличаться и коэффициенты  $A_{i,j}$  для одних и тех же тепловоспринимающих элементов. По сути дела, коэффициенты  $A_{i,j}$  являются функцией искомых величин  $J_j(0)$ .

### **3.2 Анализ спектральных аспектов проблемы определения режимов работы имитатора**

Имеется и широко используется методическое и программное обеспечение решения задачи выбора режимов работы инфракрасных имитаторов различного типа [24, 27, 35, 44]. Но эти подходы и реализующие их компьютерные программы основываются на упрощающем предположении о постоянстве спектральной поглотительной способности  $A_\lambda$  покрытий тепловоспринимающих элементов испытуемого объекта во всей полосе спектра падающего от имитатора излучения. По сути, вводится предположение о том, что покрытие каждого тепловоспринимающего элемента является серым в полосе спектра исходящего от имитатора излучения. Однако, принимая во внимание очень сильную зависимость  $A_\lambda$  многих покрытий от длины волны  $\lambda$  падающего на них излучения, а также учитывая то, что излучающие элементы имитатора могут иметь радиационную температуру, изменяющуюся в широких пределах (от малых значений до величин, превышающих 1000 К), возникает вопрос о возможных погрешностях моделирования, обусловленных введенным упрощающим предположением. Результаты оценки зависимости уровня этих погрешностей от радиационной температуры излучателей послужат основой решения вопроса о корректности и области применения известных методических подходов к определению режимов работы инфракрасных имитаторов.

В связи с этим возникает необходимость решения задачи оптимизации режима работы инфракрасного имитатора, используя итерационный процесс поиска решения. То есть сначала задаются нулевые приближения коэффициентов  $A_{i,j}$  и, минимизируя функцию  $\psi$ , вычисляется первое приближение вектора  $J(0)^{(1)}$ .

Затем, используя полученный результат, вычисляем первые приближения коэффициентов  $A_{i,j}^{(1)}$  и  $\varepsilon_j$ . Для вычисления этих коэффициентов применяют известные из теории теплообмена излучением [15] соотношения:

$$A_{i,j} = \frac{\int_{\lambda=0}^{\infty} J_{\lambda}^*(\lambda, T_j) \cdot (\varepsilon_{\lambda})_j \cdot (A_{\lambda})_i \cdot d\lambda}{\int_{\lambda=0}^{\infty} J_{\lambda}^*(\lambda, T_j) \cdot (\varepsilon_{\lambda})_j \cdot d\lambda}, \quad (3.3)$$

$$\varepsilon_j = \frac{\pi \cdot \int_{\lambda=0}^{\infty} J_{\lambda}^* \cdot (\varepsilon_{\lambda})_j \cdot d\lambda}{\sigma \cdot T_j^4}, \quad (3.4)$$

$$T_j = 4 \sqrt{\frac{J_j(0) \cdot \pi}{\varepsilon_j \cdot \sigma}}, \quad (3.5)$$

где  $J_{\lambda}^0$  - спектральная интенсивность излучения абсолютно черного тела,  $\varepsilon_j$  - интегральная степень черноты  $j$  - го излучателя,  $\sigma$  - постоянная Стефана-Больцмана. При этом

$$J_{\lambda}^* = \frac{2 \cdot C_1}{\lambda^5 \cdot (\exp(C_2/\lambda \cdot T) - 1)},$$

$$C_1 \approx 0,595 \cdot 10^{-16} \text{ Вт} \cdot \text{м}^2, \quad C_2 = 1,44 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{К}, \quad \sigma \approx 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{К}^4.$$

При известных зависимостях  $A_{\lambda} = f(\lambda)$  и  $\varepsilon_{\lambda} = \phi(\lambda)$  несобственные интегралы, входящие в выражения (3.3), (3.4) можно вычислить приближенно путем численного интегрирования в пределах от  $\lambda_1$  до  $\lambda_2$ , удовлетворяющих условиям  $\lambda_1 \cdot T \geq 1,5 \cdot 10^3 \text{ мкм} \cdot \text{К}$ ,  $\lambda_2 \cdot T \leq 5 \cdot 10^4 \text{ мкм} \cdot \text{К}$ .

При выполнении этих условий доля не учитываемой в процессе интегрирования энергии излучения является пренебрежимо малой величиной. Информация о  $A_{\lambda}$  и  $\varepsilon_{\lambda}$  обычно бывает задана в виде совокупности значений этих величин для ряда

фиксированных значений  $\lambda$ . В интервале между этими значениями предполагается линейный характер зависимости радиационных характеристик от  $\lambda$ :

$$A_\lambda = A_{\lambda(k)} + \frac{A_{\lambda(k+1)} - A_{\lambda(k)}}{\lambda(k+1) - \lambda(k)} \cdot (\lambda - \lambda(k))$$

$$\varepsilon_\lambda = \varepsilon_{\lambda(k)} + \frac{\varepsilon_{\lambda(k+1)} - \varepsilon_{\lambda(k)}}{\lambda(k+1) - \lambda(k)} \cdot (\lambda - \lambda(k))$$

Такую кусочно-линейную аппроксимацию можно использовать при численном определении интегралов в выражениях (3.3) и (3.4).

Вычислив первые приближения коэффициентов  $A_{i,j}$ ,  $\varepsilon_j$ , и температур излучателей  $T_j$ , повторно решаем задачу минимизации целевой функции  $\psi$  с целью нахождения второго приближения вектора  $J(0)$ . Итерационный процесс продолжается до тех пор, пока последующие приближения не станут незначительно отличаться от предыдущих.

Именно такой подход к решению задачи выбора режима работы имитатора представляется правильным. Однако, если элементы поверхности испытуемого объекта не являются серыми в полосе спектра, в которой сосредоточена большая часть энергии исходящего от имитатора излучения, то очевидно, что кратко охарактеризованный процесс решения задачи оптимизации режима работы имитатора может оказаться весьма трудоемким процессом.

Поэтому при практическом использовании известных методических подходов к выбору режима работы инфракрасных имитаторов обычно в выражение для целевой функции  $\psi$  вводятся не значения коэффициентов  $A_{i,j}$  (двумерный вектор), а значения коэффициентов  $\tilde{\varepsilon}_i$  (одномерный вектор), представляющих собой совокупность значений поглощательной способности тепловоспринимающих элементов по отношению к излучению, испускаемому в средней и дальней инфракрасной области спектра. То есть, по сути дела, коэффициенты  $\tilde{\varepsilon}_i$  принимаются равными  $\varepsilon_i$ - интегральной степени черноты тепловоспринимающих элементов ( $i=1,2,\dots,N$ ). Возможность такой замены при

определенных обстоятельствах следует из упрощенной и часто практически используемой трактовки закона Кирхгоффа - если в какой-то полосе спектра тело хорошо излучает, то в этой же полосе спектра оно и хорошо поглощает падающее на него излучение. Но опыт решения различных задач, связанных с поиском оптимальных режимов работы инфракрасных имитаторов, показывает, что значения интенсивности излучения модулей имитатора, определяемые по известным методикам и обеспечивающие минимум целевой функции, могут изменяться в широких пределах. Следовательно, и диапазон длин волн, где находится значимая часть энергии излучения имитатора, весьма широк. Если элементы поверхности испытуемого объекта по своим радиационным свойствам не являются серыми, то возникает вопрос о возможных погрешностях моделирования внешних тепловых нагрузок при замене коэффициентов  $A_{i,j}$  на коэффициенты  $\tilde{\epsilon}_i$ .

Особенно остро этот вопрос встает в случае определения режима работы имитатора, в котором в качестве источников излучения используются весьма удобные в эксплуатации галогенные лампы накаливания. Спектр излучения этих ламп может сильно отличаться от спектра излучения вольфрамовой спирали [36]. При небольшой подводимой к лампе мощности, когда температура спирали не превышает величину порядка 800 К и большая часть ее энергии излучения поглощается кварцевой колбой, спектр излучения лампы будет мало отличаться от спектра излучения кварцевого стекла при температуре, равной температуре колбы, и, следовательно, от спектра излучения черного тела при соответствующей температуре, поскольку при невысоких температурах диэлектрики, в том числе и стекло, имеют высокую степень черноты. Но по мере увеличения подводимой к лампе мощности и связанной с этим увеличением температуры спирали, отличие будет возрастать, так как относительная доля энергии излучения спирали, поглощаемая кварцевой колбой лампы и переизлучаемая ею в средней и дальней инфракрасной области спектра, будет уменьшаться. На данное обстоятельство обращается внимание потому, что галогенные лампы накаливания часто, например, в [49] рассматриваются как перспективный источник излучения для инфракрасных имитаторов без указания каких-либо ограничений на режим их эксплуатации.

Приведенные соображения по поводу одного из аспектов проблемы экспериментального моделирования внешних тепловых нагрузок на поверхность КА с помощью инфракрасных имитаторов свидетельствуют о необходимости решения следующей задачи.

*Постановка задачи.*

Используя известные данные о спектральной поглощательной способности применяемых в космической технике материалов и покрытий, необходимо оценить уровень возможных погрешностей моделирования заданных внешних тепловых нагрузок на поверхность КА в инфракрасных имитаторах с серыми по радиационным характеристикам излучателями при введении предположения о независимости в полосе спектра излучения имитатора спектральной поглощательной способности элементов наружной поверхности КА от длины волны излучения и на основании этих результатов рассмотреть вопрос об условиях возможного применения известных методических подходов к определению режимов работы инфракрасных имитаторов.

*Методический подход к решению задачи и исходные данные.*

Будем считать, что спектр излучения модулей имитатора соответствует спектру излучения абсолютно черного тела при соответствующей температуре. Погрешности, о которых говорится в постановке задачи, по сути дела равны величине  $\bar{\Delta}A_{i,j}$ , определяемой следующим выражением:

$$\bar{\Delta}A_{i,j} = \frac{A_i^0 - A_{i,j}}{A_{i,j}}, \quad (3.6)$$

где  $A_i^0$  - поглощательная способность какого-то  $i$ -го тепловоспринимающего элемента испытываемого объекта по отношению к падающему на него излучению от черного источника с некоторой характерной температурой  $T_0$ .

$$\text{При этом } A_i^o = \frac{\int_{\lambda=0}^{\infty} (A_{\lambda})_i \cdot J_{\lambda}^o(\lambda, T_0) \cdot d\lambda}{\int_{\lambda=0}^{\infty} J_{\lambda}^o(\lambda, T_0) \cdot d\lambda}.$$

Под характерной температурой подразумевается температура поверхности покрытия или материала, при которой определялась их интегральная степень черноты  $\varepsilon$ . Чаще всего  $\varepsilon$  определялась при предполагаемой температуре применения материалов и покрытий. В рассматриваемом случае интерес представляют данные о  $\varepsilon$ , полученным при невысоких температурах, которые сопутствуют условиям внешнего теплообмена КА. В связи с этим примем  $T_0$ , равной, допустим, 400 К. Для определения  $A_i^o$  необходима также информация о  $(\varepsilon_{\lambda})_i = f(\lambda)$ . Используя упрощенную трактовку закона Кирхгофа, можно принять  $(\varepsilon_{\lambda})_i = (A_{\lambda})_i$ .

Для вычисления значения  $A_{i,j}$  можно воспользоваться выражениями (3.3) – (3.5), приняв в них  $\varepsilon_{\lambda} = 1$  при всех  $\lambda \in (0; \infty)$ .

Данный алгоритм решения сформулированной выше задачи, реализованный в виде компьютерной программы, использовался для расчета зависимости  $\bar{\Delta}A_{i,j}$  от температуры  $T$  черного излучателя для ряда материалов и покрытий, спектральная поглощательная способность которых иллюстрируется на графиках рисунка 3.1, построенных на основании данных, приведенных в работах [16, 19, 24].

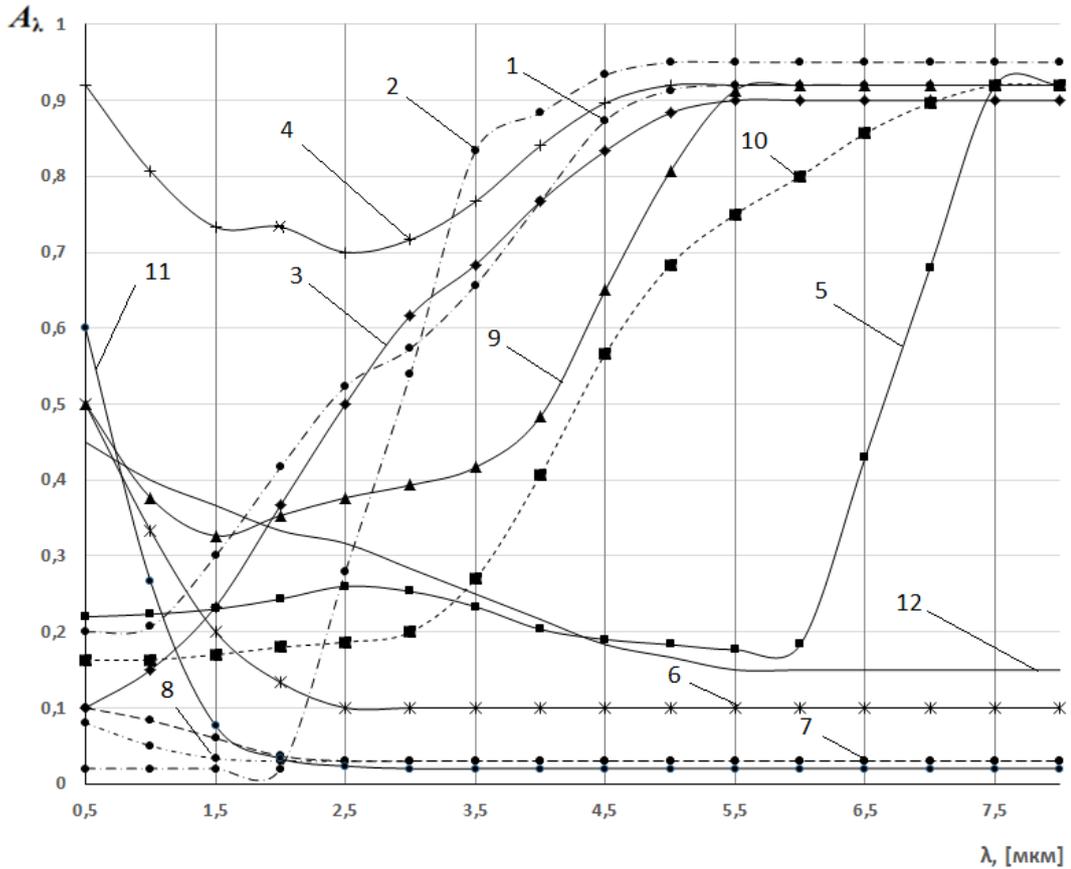


Рисунок 3.1 - Зависимость спектральной поглощательной способности  $A_{\lambda}$  некоторых материалов и покрытий от длины волны  $\lambda$  излучения

1 – белая эмаль; 2 – толстая пластина из кварцевого стекла; 3 – керамическое покрытие; 4 - зеленая эмаль; 5 – анодированный алюминий; 6 – АМГ-6; 7 – полированный алюминий; 8 – полировано серебро; 9 - белая стеклоткань; 10 – оксид алюминия; 11 – золото, полированное; 12 - титан

Результаты решения задачи и выводы. На графиках рисунка 3.1 представлены результаты расчета зависимости  $\bar{\Delta}A_{i,j}$  от температуры  $T_j$  черного излучателя для 12 материалов и покрытий, спектральная поглощательная способность которых иллюстрируется на рисунке 3.1. Условимся в дальнейшем для краткости называть материалы и покрытия одним словом - покрытия. Рассматриваемые покрытия примечательны тем, что они не являются серыми в полосе спектра, в которой заключена значимая часть энергии излучения инфракрасных имитаторов  $\lambda \in (0,5; 15)$  мкм.

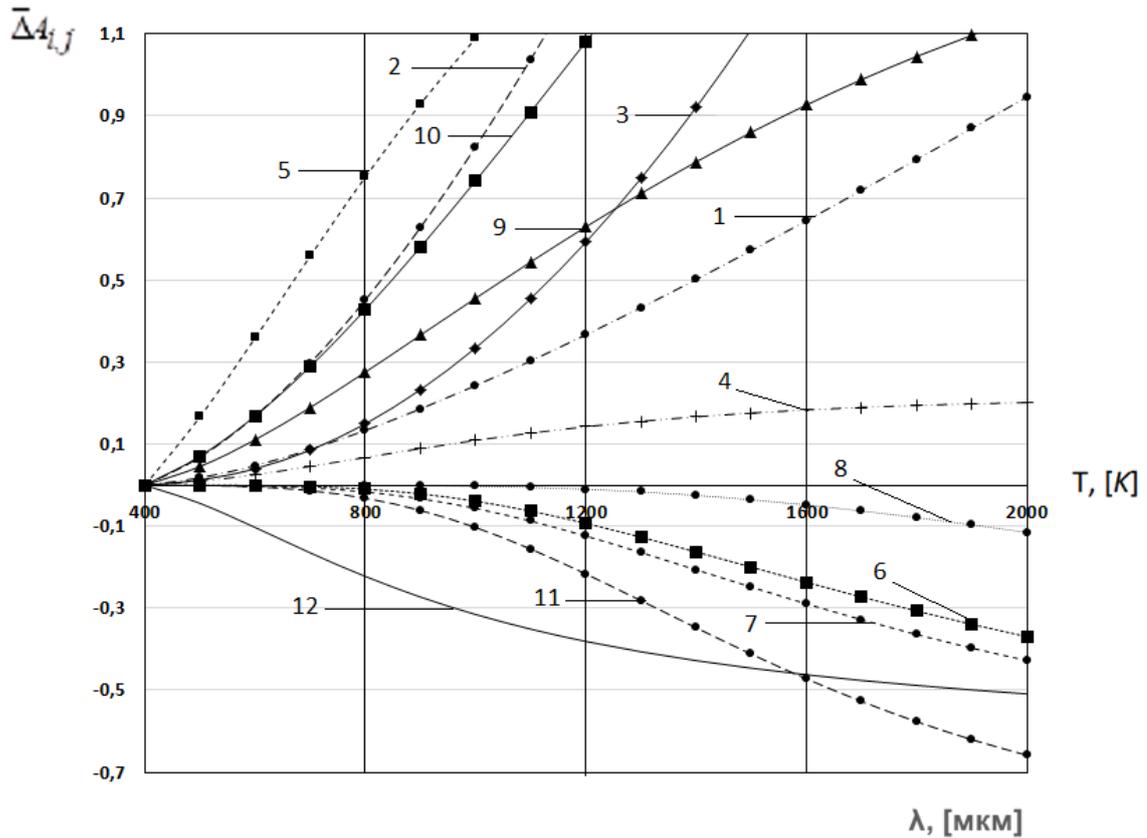


Рисунок 3.2 - Зависимость относительного отличия коэффициентов  $A_i^0$  от  $A_{i,j}$  для различных покрытий тепловоспринимающих элементов ( $i = 1, 2, \dots, 12$ ) от температуры черного излучателя  $T_j$  (номера графиков на рисунке 3.2 соответствуют номерам графиков на рисунке 3.1)

Расчет выполнялся для  $T \in [400; 2000]$  К. Результаты свидетельствуют о сильной зависимости погрешностей от температуры излучателей, особенно для тех покрытий, у которых спектральные радиационные характеристики ( $A_\lambda$  и  $\varepsilon_\lambda$ ) в ближней инфракрасной области спектра ( $\lambda \in (0,7; 4)$  мкм) кардинально отличается от этих характеристик в средней и дальней инфракрасной области ( $\lambda > 4$  мкм). Так, например, для покрытий из анодированного алюминия, кварцевого стекла, окиси алюминия погрешности превышают 50 % уже при  $T_j > 900$  К. Но именно покрытия с неоднородными по длине волны излучения радиационными характеристиками часто применяют в качестве терморегулирующих покрытий. Для покрытий, спектральные радиационные характеристики которых в средней и дальней части

инфракрасного спектра слабо зависят от длины волны излучения, погрешности при невысоких значениях температуры излучателя ( $T < 1200 \text{ K}$ ) не велики. Так для зеленой эмали, серебряного покрытия, сплава АМГ-6 погрешности не превышают 15 %. Однако в целом полученные результаты не могут быть основой для оптимистического вывода о допустимости принимаемого в используемых методических подходах определения режима работы инфракрасных имитаторов упрощающего предположении о постоянстве спектральной поглощательной способности  $A_\lambda$  покрытий тепловоспринимающих элементов испытуемого объекта во всей полосе спектра падающего от имитатора излучения. Если наружные поверхности КА по радиационным свойствам в инфракрасной области спектра близки к серым поверхностям, то очевидно, что такое предположение является допустимым. Для общего же случая необходима корректировка известных методик решения задачи выбора оптимальных режимов работы инфракрасных имитаторов используя охарактеризованный выше итерационный процесс поиска решения задачи, заключающийся в многократном определении вектора  $J(0)$  путем минимизации целевой функции  $\psi$  и одновременном уточнении значений коэффициентов  $A_{i,j}$  на основании полученных на каждой итерации значений вектора  $J(0)$ .

#### **Глава 4. Имитатор модульного типа с блочными условно линейчатыми излучателями**

В данной главе представлены результаты исследований по проблеме создания инфракрасного имитатора модульного типа с блочными условно линейчатыми излучателями, скомпонованными в отдельные автономно управляемые блоки. В качестве излучателей могут применяться нагреваемые электрическим током провода, ленты, различные трубчатые лампы накаливания, керамические трубчатые нагреватели. Целесообразность создания такого имитатора следует из анализа достоинств и недостатков сетчатых нагревателей, используемых при проведении автономных тепловакуумных испытаний отдельных элементов космических аппаратов с преимущественно плоскими внешними поверхностями.

Сетчатые нагреватели, которые рассматривались во второй главе диссертации, устанавливаются в непосредственной близости от тех участков поверхности испытываемого объекта, на которые они должны воспроизводить расчетные внешние тепловые нагрузки.

Обладая рядом достоинств, например, такими как простотой в изготовлении и эксплуатации, незначительным экранированием облучаемой поверхности, сетчатые излучатели в то же время имеют серьезный недостаток, чрезвычайно ограничивающий область их применения: каждый излучатель должен участвовать в облучении лишь той поверхности, в непосредственной близости от которой он находится. Пересечение областей их лучистого воздействия приводит к появлению погрешностей моделирования облученности испытываемого объекта с неплоской формой наружной поверхности. В связи с этим актуальной является задача создания имитатора внешних тепловых нагрузок на основе совокупности сетчатых излучателей, установленных вокруг испытываемого объекта на существенном от него расстоянии с тем, чтобы каждый модуль мог участвовать в облучении различных по ориентации и расположению тепловоспринимающих элементов испытываемого объекта.

В обеспечение создания такого имитатора необходимо решить, по крайней мере, следующие задачи:

1) Выявить среди известных оптимальный методический подход и алгоритм расчета локальных угловых коэффициентов между тепловоспринимающими элементами испытуемого объекта и элементами сетчатых модулей имитатора;

2) Установить зависимость плотности падающего на элемент испытуемого объекта теплового потока от подводимой к сетчатому модулю электрической мощности и его геометрических параметров;

3) Выявить оптимальный в отношении точности воспроизведения заданных внешних тепловых нагрузок закон распределения подводимой к модулям электрической мощности.

#### **4.1 Методический подход к определению локальных угловых коэффициентов**

Рассмотрим изображенный на рисунке 4.1 и рисунке 4.2 имитатор цилиндрической формы, содержащем на боковой и торцевых ажурных, но достаточно жестких поверхностях однотипные сетчатые излучатели (модули).

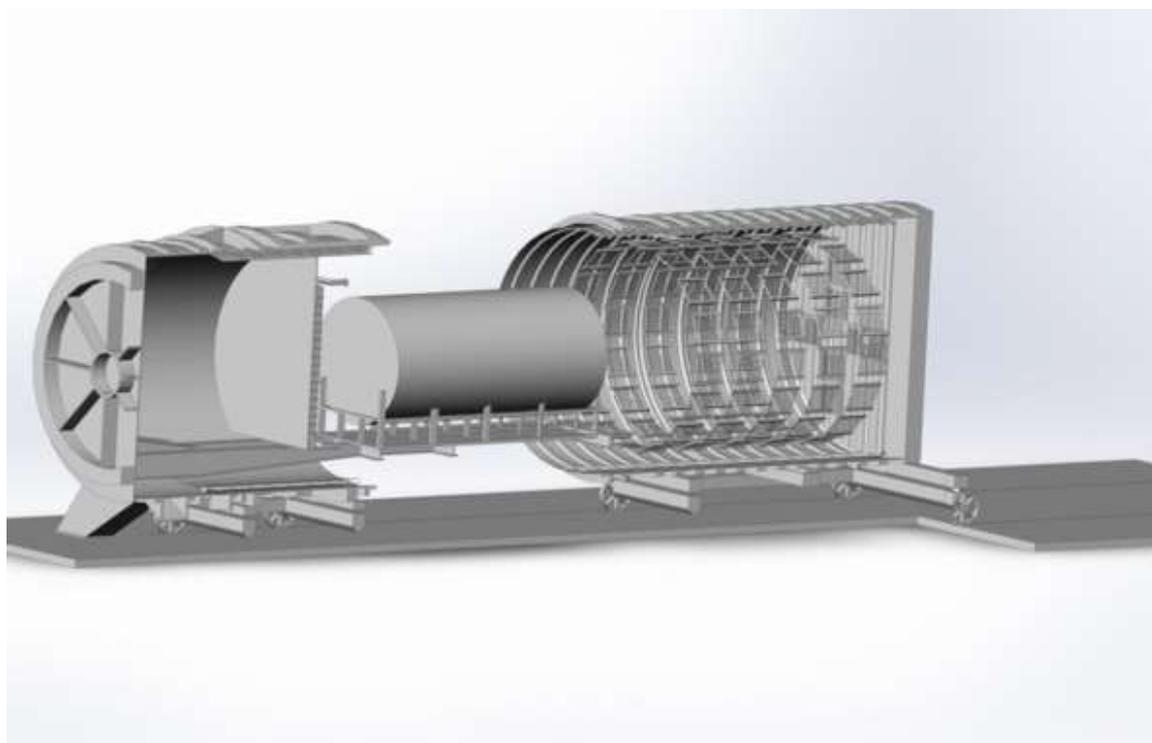


Рисунок 4.1 - Расположение сетчатых модулей в тепловакуумной установке

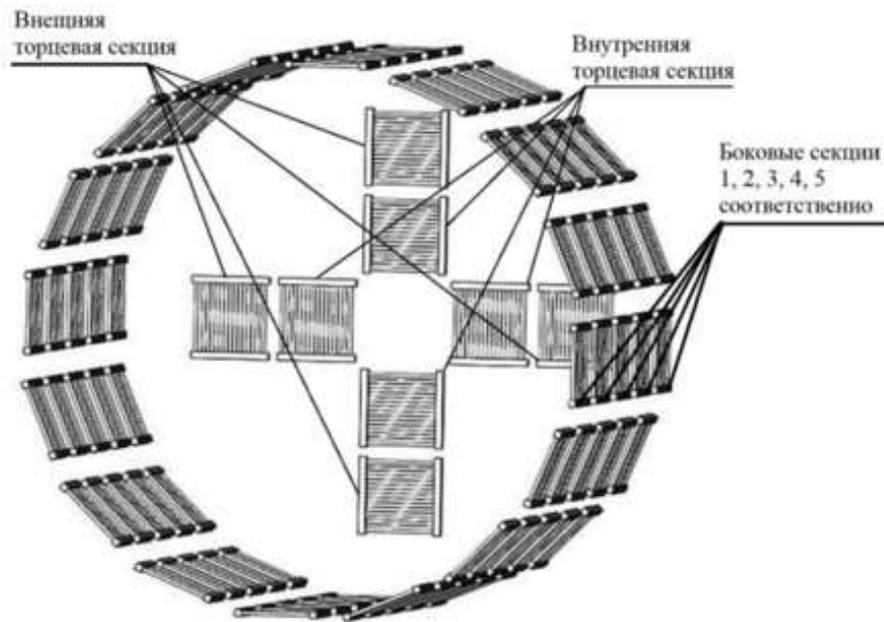


Рисунок 4.2 - Геометрическая модель имитатора (представлена без каркаса)

Введем упрощающее предположение, заключающееся в том, что сетчатый излучатель будем рассматривать как совокупность параллельно расположенных и параллельно запитываемых электрическим током одинаковых по длине проводов длиной  $l$  и диаметром  $d$ . Такое допущение можно принять в силу того, что в реальных сетчатых излучателях  $l > \Delta b$ , где  $\Delta b$  - шаг между проводами. Число проводов в модуле примем равным  $N$ . Чтобы в модуле была центральная нить, число  $N$  должно быть нечетным. Середину центральной нити будем считать центральной точкой модуля. Предположим, что на боковой поверхности цилиндрической части каркаса имитатора модули располагаются так, что их нити параллельны образующим прямых каркаса имитатора, а центральные нити лежат на самом каркасе. У торцевых модулей центральные точки размещаются на концентрических окружностях разного диаметра, но с одинаковым угловым шагом.

Расположение каждого  $j$ -го сетчатого модуля определим цилиндрическими координатами центральных их точек в связанной с каркасом имитатора системе координат  $(R_j, \gamma_j, Z_j)$ . Тогда середина каждого  $k$ -го излучающего элемента этого

модуля (провода длиной  $l$ ) в связанной с каркасом имитатора системе координат будет иметь следующие координаты:

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

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

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

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

Локальных угловых коэффициентов  $\varphi_{di-j}$  между тепловоспринимающим элементом  $dF_i$  испытуемого объекта и  $j$ -ым сетчатым модулем имитатора будет равен сумме локальных угловых коэффициентов между площадкой  $dF_i$  и всеми  $N$  проводами  $j$ -го модуля. То есть

$$\varphi_{di-j} = \sum_{k=1}^N d\varphi_{di-k} \quad (4.1)$$

Апробированы два метода расчета коэффициента  $\varphi_{di-j}$  для сетчатых нагревателей [33, 32, 35]. Первый из них основан на аппроксимации короткого по длине участка поверхности излучающей нити поверхностью многогранника с треугольными гранями, а другой - на замене цилиндрического такого участка излучающей нити плоским излучателем с изменяющейся в зависимости от расположения тепловоспринимающего элемента ориентацией. Результаты сопоставления свидетельствуют о предпочтительности второго подхода. В основе замены лежит то обстоятельство, что в направлении любого элемента тепловоспринимающей поверхности достаточно короткий элемент излучающей нити, имеющей круглое сечение, испускает излучение практически как плоский элемент  $dF_j$  ширина которого равна диаметру нити  $d$ , а нормаль лежит в плоскости  $\Omega$ , проходящей через ось нити и вектор  $\vec{\rho}_{dj-di}$  с началом в центральной точке этого плоского элемента и концом - в центральной точке элемента  $dF_i$  тепловоспринимающей поверхности. Если, например,  $d/\rho = 0,01$ , то угловой

диаметр излучающего элемента не превышает  $0,29^\circ$ . То есть лучи, исходящие от него, можно считать параллельными.

#### 4.2 Плотность теплового потока, падающего на элементы испытываемого объекта

Подводимая к сетчатому модулю электрическая мощность  $W_j$  за счет излучения его проводов рассеивается в окружающее пространство. Интенсивность  $I$  уходящего с поверхности проводов излучения при диффузном характере их излучения и при степени черноты их поверхности  $\varepsilon$  может быть представлена в виде  $I = \varepsilon \cdot I^0$ , где  $I^0$  - интенсивность (яркость) излучения абсолютно черного тела с температурой, равной температуре провода.

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

$$q_i = \varepsilon \cdot \pi \cdot I_j \cdot \varphi_{i-j}, \quad (4.2)$$

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

Если обозначить через  $W_j$  величину мощности, подводимой к  $j$ -ому модулю, то очевидно, что  $W_j = \varepsilon \cdot \pi \cdot I_j \cdot \pi \cdot d \cdot N$  (4.3)

С учетом соотношения (4.3) выражение для  $q_i$  примет другой более удобный для последующего решения задачи вид:

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

Используя соотношения (4.2) и (4.3), можно выразить  $I_j$  через  $W_j$ . Это позволит для оптимизации режима работы имитатора с сетчатыми модулями

использовать те же методические подходы, что и для имитаторов модульного типа с линейчатыми или условно точечными излучателями.

### 4.3 Оптимизация режима работы имитатора

Задачу определения оптимального в отношении точности воспроизведения заданных внешних тепловых нагрузок закона распределения подводимой к модулям электрической мощности будем решать как одну из обратных задач теории управления тепловыми процессами [1] в следующей постановке. Пусть  $q^0 = (q_1^0, q_2^0, q_3^0, \dots, q_n^0)$  – вектор заданных значений плотности теплового потока в определенных точках поверхности испытуемого объекта, а вектор  $W^0 = (W_1, W_2, \dots, W_m)$  – вектор управления. Координаты этого вектора представляют собой упорядоченную совокупность значений электрической мощности, подводимой к модулям сетчатого имитатора.

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

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

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

Решаемая задача сводится к минимизации функции  $\psi(W^0)$  при следующих естественных физических ограничениях на искомые величины  $W_j$ :  $W_j \geq 0$ ;  $W_j \leq W_{MAX}$  при любых  $j \in [1; m]$ . Воспользуемся итерационным алгоритмом оптимизации вектора  $W_0$ :  $W_0^{(k+1)} = W_0^{(k)} + \Delta W_0^{(k)}$ ,

где надстрочный индекс  $k$  – номер какого-то приближения. Начальное приближение искомого вектора можно задавать в значительной степени

произвольно. В качестве приращения  $\Delta W_0^k$  при переходе к следующему приближению используется вектор  $\Delta W_0^k = -\beta^{(k)} \cdot I^{(k)}$ , где  $I^{(k)}$  – векторная величина, определяющая направление спуска, то есть направление перехода от вектора  $W_0^{(k)}$  к вектору  $W_0^{(k+1)}$ , а  $\beta^{(k)}$  – скалярная величина, характеризующая длину шага вдоль этого направления (глубину спуска). В данной работе направление спуска определялось методом скорейшего спуска, то есть определялось направлением, противоположным градиенту функционала  $\psi(W_0)$ , (противоположным вектору  $\psi^i(W_0) = (\partial\psi/\partial W_1; \partial\psi/\partial W_2; \dots; \partial\psi/\partial W_m)$ )

Что касается величины  $\beta^{(k)}$ , то она определялась численно. А именно: увеличивая  $\beta^{(k)}$  от некоторого малого значения с каким-то малым шагом, постоянно осуществлялся расчет величины целевой функции  $\psi$ , 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  $W_0^{(k)}$  к вектору  $W_0^{(k+1)}$ .

Вычислив  $k+1$  приближение вектора  $W_0^{(k+1)}$ , переходим к определению следующего приближения. На каждой итерации значение вектора  $W_0$  корректируется в связи с необходимостью выполнения условий по ограничению этого вектора. Итерационный процесс прекращается, как только наметится тенденция к увеличению целевой функции.

#### 4.4 Вычислительный эксперимент

Пусть в имитаторе с цилиндрическим каркасом установлен симметрично расположенный с ним испытуемый объект цилиндрической формы.

На боковой поверхности имитатора сетчатые модули расположены в 5 равноотстоящих друг от друга секциях - по 16 модулей в каждом сечении, а на торцевых панелях - по 8 модулей на каждой.

Требуется определить такое распределение подводимой к модулям имитатора электрической мощности, при котором достигается максимальная точность моделирования заданной внешней тепловой нагрузки на поверхность испытуемого объекта с определенными относительными размерами. В качестве примера для теплового расчета были выбраны следующие условия. Объект находится над поверхностью Земли на высоте 300 км в подсолнечной точке (зенитный угол Солнца равен  $0^\circ$ ). Продольная ось  $oz$  объекта располагалась параллельно поверхности Земли, а ось  $ox$  направлена к центру Земли. При этом ось  $-ox$  направлена на Солнце. Сферическое альbedo Земли  $a_{cf}$  принималось равным 0,35, а величина солнечной постоянной  $S = 1400 \text{ Вт/м}^2$ .

Расчет плотности внешних тепловых, падающих на элементы рассматриваемого цилиндрического объекта осуществлялся по методике, изложенной в работе [14]. Для решения рассматриваемой задачи необходимо задать геометрические модели имитатора и испытываемого объекта. Эти модели должны быть полными в той мере, чтобы можно было определить величины локальных угловых коэффициентов между тепловоспринимающими элементами испытуемого объекта и модулями имитатора.

К имеющимся обозначениям введем следующие дополнительные обозначения:  $D$  - диаметр имитатора;  $L$  - его длина;  $d_0$  - диаметр и  $l_0$  - соответственно диаметр и длина испытываемого объекта. Размеры испытываемого объекта и длину имитатора будем относить к диаметру имитатора.

#### 4.4.1 Геометрическая модель имитатора

Как уже отмечалось расположение каждого  $j$  - го сетчатого модуля боковой поверхности имитатора ( $j = 1, \dots, n$ ) определяется цилиндрическими координатами центральных их точек в связанной с каркасом имитатора цилиндрической системе координат  $(R_j, \gamma_j, Z_j)$ .

Расположение центральных точек торцевых модулей задается в полярных координатах в торцевых плоскостях имитатора. Длина каждого модуля равна длине провода  $l$ . Ширина модуля  $b = (N - 1) \cdot \Delta b$ , где  $N$  - число проводов в модуле,  $\Delta b$  - шаг между ними.

В рассматриваемой модельной задаче геометрическим параметрам имитатора и испытуемого объекта присваиваются следующие значения:  $D = 3$  м;  $L/D = 1,5$ ;  $l_0/d_0 = 1,5$ ;  $d_0/D = 0,4$ ;  $d = 10^{-3}$  м;  $N = 11$ ;  $l = 0,3$  м;  $\Delta b = 10^{-2}$  м;  $b = 0,1$  м.

#### 4.4.2 Геометрическая модель испытуемого объекта

Для расчета лучистого теплообмена испытуемого объекта в имитаторе необходимо знать координаты центральных точек элементов поверхности испытуемого объекта, ориентацию их нормалей, площади поверхности каждого элемента. В связи с этим целесообразно осуществить аппроксимацию поверхности исследуемого объекта многогранной поверхностью с треугольными гранями. После чего определяются ориентации нормалей, координаты центральных точек и площади каждой грани. Центральные точки треугольных граней при этом определялись как точки пересечения их медиан. Этот подход к заданию геометрической модели поверхности испытуемого объекта описан в монографии [24] и реализован в данной работе в виде компьютерной программы. В результате в модельной задаче боковая поверхность испытуемого объекта была аппроксимирована поверхностью многогранника с 912 треугольными гранями. Пояса образованы 20 поперечными сечениями цилиндрической поверхности, следующих друг за другом с одинаковым шагом  $\Delta z = l_0/20$ . Аппликата первого сечения равна 0, последнего -  $l_0$ .

Разбиение торцевых поверхностей цилиндра на мелкие площадки осуществляется с помощью системы окружностей с радиусами  $R_j$ , изменяющимися от 0 до  $d/2$  с шагом  $dR$ , и прямых, проходящих через центр круга

под углом  $\gamma$  по отношению к оси  $ox$  с угловым шагом  $d\gamma$ . В этом случае координаты центральных точек площадок  $dF_i$  можно представить в виде

$$x_i = (R_i - dR/2) \cdot \cos(\gamma - d\gamma/2);$$

$$y_i = (R_i - dR/2) \cdot \sin(\gamma - d\gamma/2);$$

$z_i = 0$  - для нижнего торца и  $z_i = -1$  - для верхнего торца. Выражение для площадей торцевых элементарных площадок деления при принятых обозначениях имеет вид:  $dF_i = (R_i^2 - (R_i - dR/2)^2) \cdot d\gamma/4$ .

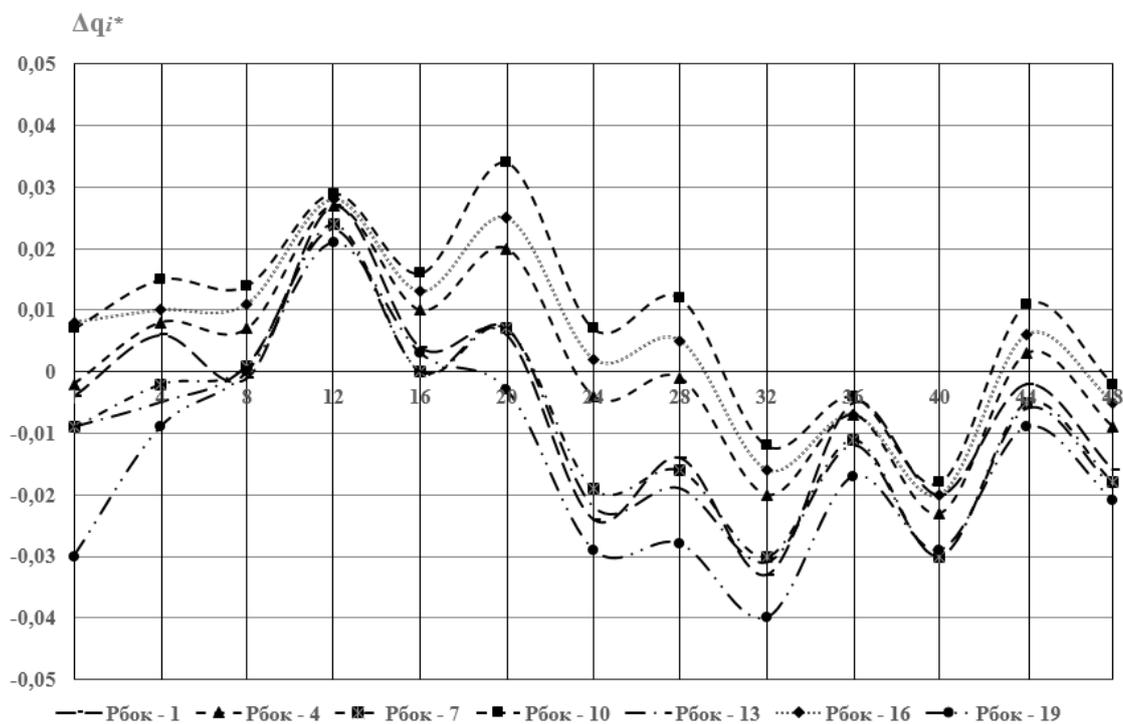
Всего на поверхности объекта выделялось 1872 тепловоспринимающих элементов (элементарных площадок). В качестве радиационно-оптических характеристик поверхности объекта, принимались характеристики широко применяемой в космической технике облицовочной арамидной желтой ткани, со следующими значениями параметров  $A_s \approx 0,29$ , а  $\varepsilon \approx 0,55$ .

#### 4.4.3 Результаты расчета

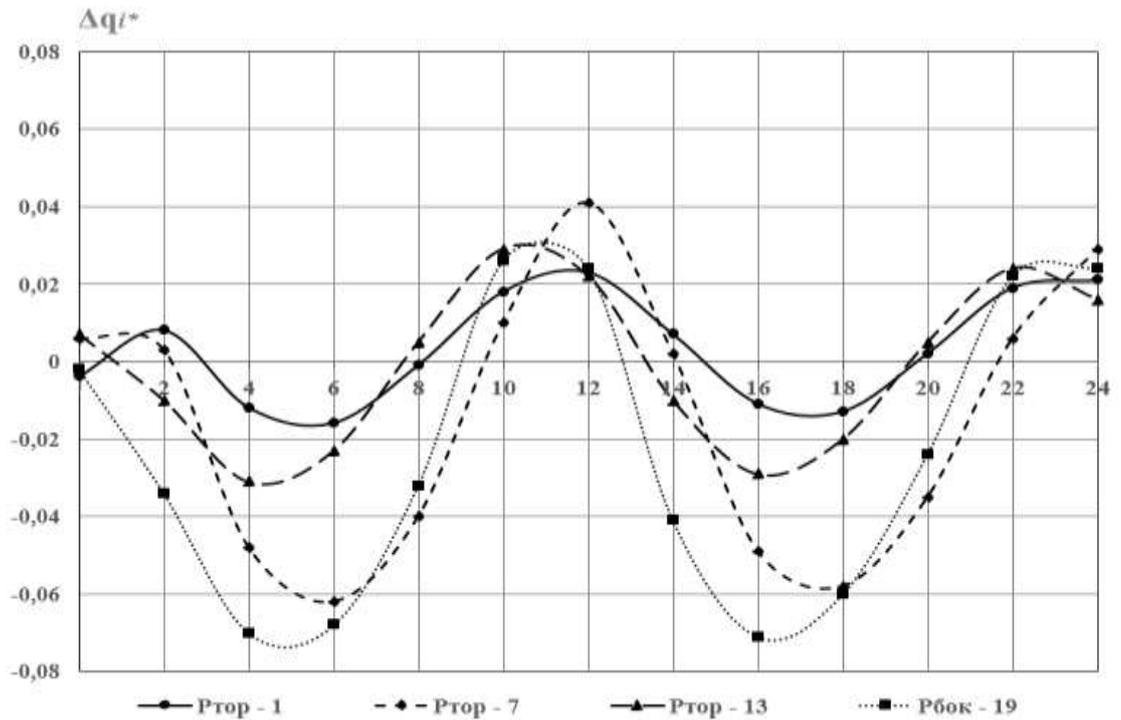
Полученные в результате решения задачи абсолютные размерные погрешности  $\Delta q_i$  ( $i \in [1, n_{\max}]$ ) моделирования расчетных значений тепловых нагрузок относились к характерной  $q_{хар}$  для данной задачи величине, в качестве которой принималась, величина максимальной локальной плотности поглощаемого поверхностью испытуемого объекта потока излучения, исходящего от Солнца и Земли. Эта величина оказалась равной 403 Вт/м<sup>2</sup>. В работе, следовательно, анализировались безразмерные локальные погрешности  $\Delta q_i^* = \Delta q_i / q_{хар}$ .

Погрешности на графиках рисунка 4.3 представлены для нескольких элементов, сгруппированных следующим способом: элементы боковой (цилиндрической) поверхности сгруппированы по поясам, которые образованы соседними поперечными сечениями поверхности объекта. Номера поясов на графиках обозначены символом  $P_{бок}$ . Группы элементов торцевых поверхностей образованы

соседними окружностями, с помощью которых торцевая поверхность (круг) делится на отдельные элементы. Погрешности моделирования внешних тепловых нагрузок для левой и правой торцевых частей объекта отличаются незначительно благодаря симметричному расположению объекта относительно имитатора. Поэтому погрешности моделирования тепловых нагрузок на торцевые поверхности в работе представлены только для одного торца (рисунок 4.3 б). При этом номера поясов на графиках обозначены символом  $P_{тор}$ , а номера тепловоспринимающих элементов в каждом поясе приводятся на графиках по оси абсцисс.



a)



б)

Рисунок 4.3 - Безразмерные погрешности моделирования расчетных тепловых нагрузок в точках поверхности цилиндрического испытываемого объекта в имитаторе с блочными сетчатыми излучателями. Точки расположены в определенных поясах сечений поверхности; а – боковая поверхность, б – торцевая поверхность

Значения электрических мощностей, подводимых к модулям имитатора и температуры проводов представлены в таблице 4.1 и 4.2.

Таблица 4.1 Величины  $W_j$  [Вт] электрических мощностей, подводимых к боковым модулям имитатора и температуры  $T_j$  [К] проводов боковых модулей

Номер модуля (сетки) в секции	Номер боковых секций имитатора				
	1	2	3	4	5
1	283/917	267/903	297/928	281/915	387/991
2	212/853	75/657	91/691	54/606	118/736

Продолжение таблица 4.1

Номер модуля (сетки) в секции	Номер боковых секций имитатора				
	1	2	3	4	5
3	247/886	256/ 894	274/909	268/904	328/951
4	48/588	7/367	9/384	0/0	17/451
5	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
6	303/933	242/881	266/903	236/846	336/957
7	323/947	215/856	244/883	215/856	312/939
8	435/1021	362/975	380/987	345/963	454/1031
9	424/1014	339/959	365/977	343/962	458/1034
10	395/996	252/890	291/923	238/878	376/984
11	348/965	307/935	322/947	309/937	379/986
12	101/709	59/620	70/646	57/614	95/699
13	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
14	197/8370	134/760	152/785	134/761	185/824
15	220/860	167/803	194/835	169/806	261/899
16	224/865	165/801	161/796	150/782	164/800

Таблица 4.2 Величины  $W_j$  [Вт] электрических мощностей, подводимых к торцевым модулям имитатора и температуры  $T_j$  [К] проводов торцевых модулей.

Торцевая секция (Z=0)	
внутренняя секция	внешняя секция
27 / 508	52 / 599
23 / 490	58 / 618
27 / 510	35 / 544
21 / 480	55 / 608

### Выводы по результатам вычислительного эксперимента

1. Результаты вычислительных экспериментов свидетельствуют о том, что разработанный метод экспериментального моделирования тепловых нагрузок на внешние поверхности космических аппаратов с помощью имитаторов модульного типа на основе сетчатых излучателей позволяет с высокой точностью обеспечивать воспроизведение расчетных внешних тепловых нагрузок на взаимно незатеняемые поверхности в том числе и на поверхности околопланетных аппаратов, подвергающиеся одновременному воздействию потоков излучения, исходящих от Солнца и планеты.

2. Представленный в работе метод моделирования тепловых нагрузок и его реализация в виде вычислительного алгоритма могут быть использованы в любых имитаторах модульного типа с условно линейчатыми излучателями – трубчатыми, ленточными.

#### **4.5 Исследование по вопросу о целесообразности использования в конструкции модуля имитатора трубчатых ламп накаливания**

Очевидным является то, что при использовании в конструкции блочных модулей тонких нагреваемых электрическим током проводов, возникают сложности конструктивного и эксплуатационного характера (провисание проводов при их нагреве, необходимость обеспечения их натяжения и т.п.). В связи с этим возникает вопрос о возможности использования в конструкции блочного модуля трубчатых ламп накаливания.

Многие материалы и покрытия элементов КА, подверженных воздействию внешних тепловых потоков, имеют нерегулярный характер зависимости от длины волны излучения  $\lambda$  спектральной поглощательной способности в видимой и ближней инфракрасной областях спектра, но в средней и дальней инфракрасной области у большинства материалов и покрытий наблюдается относительно слабая зависимость спектральных поглощательных свойств от  $\lambda$ . Если окажется, что большая часть энергии излучения элементов имитатора заключена именно в этой области спектра, то точность моделирования внешних тепловых нагрузок будет существенно возрастать. Отмеченные особенности спектральных поглощательных свойств внешних поверхностей элементов КА порождают вопросы в отношении условий рационального использования в инфракрасных имитаторах таких популярных источников излучения как галогенные кварцевые лампы накаливания (ГЛН). Они часто рассматриваются и как перспективные источники излучения для инфракрасных имитаторов. Однако следует заметить, что особенностью моделируемых в этих имитаторах тепловых потоков является сравнительно небольшая их плотность - для околоземных КА не превышающая приблизительно  $1400 \text{ Вт/м}^2$ . Поэтому в инфракрасных имитаторах нет необходимости в использовании высокотемпературных источников излучения. При этом эти лампы имеют неблагоприятную для использования их в инфракрасных имитаторах особенность, которая заключается в том, что спектр исходящего от них излучения радикально отличается от спектра излучения серого тела. Излучение в ГЛН

формируется в процессе сложного теплообмена в системе, основными элементами которой является вольфрамовая спираль и кварцевая колба, обладающие ярко выраженными селективными спектральными излучательными и, следовательно, поглощательными свойствами.

Возникает вопрос об условиях рационального применения трубчатых кварцевых ламп накаливания с вольфрамовой спиралью, в частности, галогенных, в составе инфракрасных имитаторов внешних тепловых нагрузок на поверхность космического аппарата.

#### **4.5.1 Радиационные свойства трубчатых ламп накаливания с вольфрамовой спиралью**

Рассмотрим кварцевую лампу накаливания, например, галогенную (ГЛН), источником излучения в которой служит нагреваемая электрическим током вольфрамовая спираль. Вольфрам, из которого изготавливаются излучатели большинства ламп накаливания, отличается от других материалов, претендующих на роль излучателей, особым характером зависимости спектральной степени черноты  $\epsilon_\lambda$  от длины волны  $\lambda$  излучения. В видимой области спектра  $\epsilon_\lambda$  вольфрама в широком температурном диапазоне находится в пределах диапазона (0,4;0,45) мкм [15, 16]. Но по мере увеличения  $\lambda$  его спектральная степень черноты уменьшается и при  $\lambda = 4$  мкм составляет уже величину, не превышающую 0.1, а в дальней инфракрасной области спектра ( $\lambda > 10$  мкм) величина  $\epsilon_\lambda$  снижается до уровня 0.05. Согласно экспериментальным данным интегральная степень черноты  $\epsilon$  вольфрама при температуре  $T < 600$  К так же не превышает величину 0.05, а при  $T = 1200$  К  $\epsilon$  приблизительно равняется 0.13. Таким образом, можно сказать, что вольфрам являясь хорошим материалом для излучающих спиралей осветительных ламп, неплохим материалом спиралей ламп, предназначенных для создания тепловых потоков большой плотности, но, в то же время, является плохим материалом излучателей, предназначенных для воспроизведения лучистых

потоков, основная часть энергии которых находится в средней и дальней области спектра.

#### 4.5.2 Радиационная модель лампы

Примем следующий механизм формирования, уходящего с поверхности лампы излучения, полагая, что в спектре излучения ГЛН не присутствует (ввиду относительной малости) энергия излучения заполняющих колбу газов (аргона и паров йода).

Кварцевая колба, материал которой обладает селективным внутренним поглощением, хорошо пропускает через свои стенки излучение спирали с длиной волны, не превышающей приблизительно 3,5 мкм и поглощает большую часть энергии излучения с длиной волны, превышающей 4,5 мкм. Колба, нагреваясь за счет поглощаемой энергии излучения спирали, сама становится источником инфракрасного излучения с длиной волны, превышающей, по крайней мере, 3 мкм, что следует из закона Кирхгоффа [15]. Таким образом, спектральный состав излучения, исходящего от поверхности лампы, является сложным.

Радиационную модель лампы составим при следующих упрощающих предположениях относительно ее геометрических характеристик и радиационно-оптических свойств вольфрамовой спирали и кварцевой колбы.

- Излучение, испускаемое лампой, исходит с поверхности колбы (эффективной поверхности).
- Каждый элемент эффективной поверхности излучает диффузно.
- Локальная плотность излучения по всей эффективной поверхности одинакова.
- Диаметр колбы  $D$  мал по сравнению с ее длиной  $l$ , т.е.  $D < l$ .
- Длина вольфрамовой излучающей спирали принимается равной длине колбы.
- Излучение спирали рассматривается как излучение цилиндрической поверхности с диаметром  $d$ , соответствующим внешнему диаметру спирали; спектральная степень черноты этой цилиндрической поверхности принимается равной спектральной степени черноты  $\varepsilon_{\lambda,w}$  вольфрама.

- Не учитывается энергия излучения, отраженного на границе раздела сред (газ - стенка внутренней поверхности колбы).

- Под плотностью потока исходящего от лампы излучения будем понимать плотность потока излучения цилиндрической поверхности с диаметром  $D$ , равным диаметру колбы.

- Во всех выражениях, касающихся энергии излучения спирали, колбы и лампы в целом подразумевается энергия излучения, исходящего от единицы длины излучающего элемента.

Используя закон излучения Планка, а также имеющиеся в литературе данные о спектральной и интегральной степени черноты вольфрама и кварцевого стекла, представим перечисленные радиационные характеристики в виде функций температуры спирали  $T_w$ .

Согласно закону Планка, спектральная поверхностная плотность потока излучения абсолютно черного тела при температуре спирали  $T_w$ :

$$q_{\lambda,b}(T_w) = \frac{2\pi \cdot C_1}{\lambda^5 (\exp(C_2/\lambda T_w) - 1)},$$

где  $C_1 \approx 0.59544 \cdot 10^{-16} \text{ Вт} \cdot \text{м}^2$ ,  $C_2 \approx 1,44 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{К}$ .

Радиационные характеристики лампы могут быть определены с помощью приведенных ниже выражений, вытекающих из физического смысла этих характеристик и некоторых основных положений теории лучистого теплообмена.

Спектральная плотность потока излучения спирали, отнесенная к площади поверхности колбы:

$$q_{\lambda,w}(T_w) = \bar{d} \cdot \varepsilon_{\lambda,w} \cdot q_{\lambda,b}(T_w),$$

где  $\bar{d} = d/D$  - относительная величина условного диаметра спирали.

Спектральная плотность поглощаемого колбой потока излучения, исходящего от спирали:

$$q_{\lambda,w}^*(T_w) = \bar{d} \cdot \varepsilon_{\lambda,kolb} \cdot \varepsilon_{\lambda,w} \cdot q_{\lambda,b}(T_w),$$

где - подстрочные индексы  $\lambda$ ,  $w$ ,  $kolb$  относятся соответственно к спектральным радиационным характеристикам, к радиационным характеристикам вольфрама и

кварцевой колбы, а подстрочный индекс  $b$  относится к радиационным характеристикам абсолютно черного тела.

Спектральная поверхностная плотность потока собственного излучения наружной поверхности колбы:

$$q_{\lambda, kolb} = \varepsilon_{\lambda, kolb} \cdot q_{\lambda, b}(T_{kolb}),$$

$$\text{где } \varepsilon_{kolb} = \frac{\int_0^{\infty} q_{\lambda, kolb}^* \cdot d\lambda}{\int_0^{\infty} \bar{d} \cdot \varepsilon_{\lambda, w} \cdot q_{\lambda, b}(T_w) \cdot d\lambda}, \quad T_{kolb} = \sqrt[4]{\frac{\int_0^{\infty} q_{\lambda, kolb}^* \cdot d\lambda}{\varepsilon_{kolb} \cdot \sigma}}.$$

Спектральная поверхностная плотность потока излучения абсолютно черного тела при температуре колбы  $T_{kolb}$ :

$$q_{\lambda, b}(T_{kolb}) = \frac{2\pi \cdot C_1}{\lambda^5 (\exp(C_2 / \lambda \cdot T_{kolb}) - 1)}.$$

Спектральная плотность потока излучения, исходящего с поверхности лампы:

$$q_{\lambda, lamp}(T_w) = q_{\lambda, w}(T_w) + q_{\lambda, kolb}(T_{kolb}).$$

Относительная величина спектральной плотности потока излучения, исходящего с поверхности лампы:

$$\bar{q}_{\lambda, lamp}(T_w) = q_{\lambda, lamp}(T_w) / q_{\lambda, max}(T_w),$$

где  $q_{\lambda, max}(T_w)$  - максимальное значение спектральной плотности потока излучения лампы.

Плотность интегрального потока излучения, уходящего от поверхности лампы:

$$q_{lamp}(T_w) = \int_0^{\infty} q_{\lambda}(T_w) \cdot d\lambda.$$

Большой интерес представляет соотношение между величиной плотности уходящего от поверхности лампы интегрального потока ее излучения  $q_{lamp}(T_w)$  и величиной  $\bar{d} \cdot q_b(T_w)$  плотности потока излучения, исходящего от черной цилиндрической поверхности с температурой  $T_w$  и с диаметром, равным условному

диаметру спирали, и, как бы, беспрепятственно проходящего через колбу. Это соотношение можно трактовать как эффективную степень черноты лампы -  $\varepsilon_{lamp}$ .

$$\varepsilon_{lamp} = \frac{q_{lamp}(T_w)}{\bar{d} \cdot q_b(T_w)}.$$

Таким образом, основные радиационные характеристики лампы являются функциями температуры спирали и зависят от спектральной степени черноты вольфрама, кварцевого стекла и параметра  $\bar{d}$ . Анализируя имеющуюся в литературных источниках информацию о геометрических характеристиках кварцевых галогенных лампах накаливания (ГЛН), можно принять значение параметра  $\bar{d}$  в пределах [0.3; 0.7]. Данные о зависимости величин  $\varepsilon_{\lambda,w}$  и  $\varepsilon_{\lambda,kolb}$  от  $\lambda$  заимствовались из [15, 16]. Дискретные их значения с использованием сплайн-интерполяции представлялись в виде непрерывных функций  $\varepsilon_{\lambda,w} = f(\lambda)$  и  $\varepsilon_{\lambda,kolb} = \varphi(\lambda)$ , проиллюстрированных на рисунке 4.4 в виде графиков.

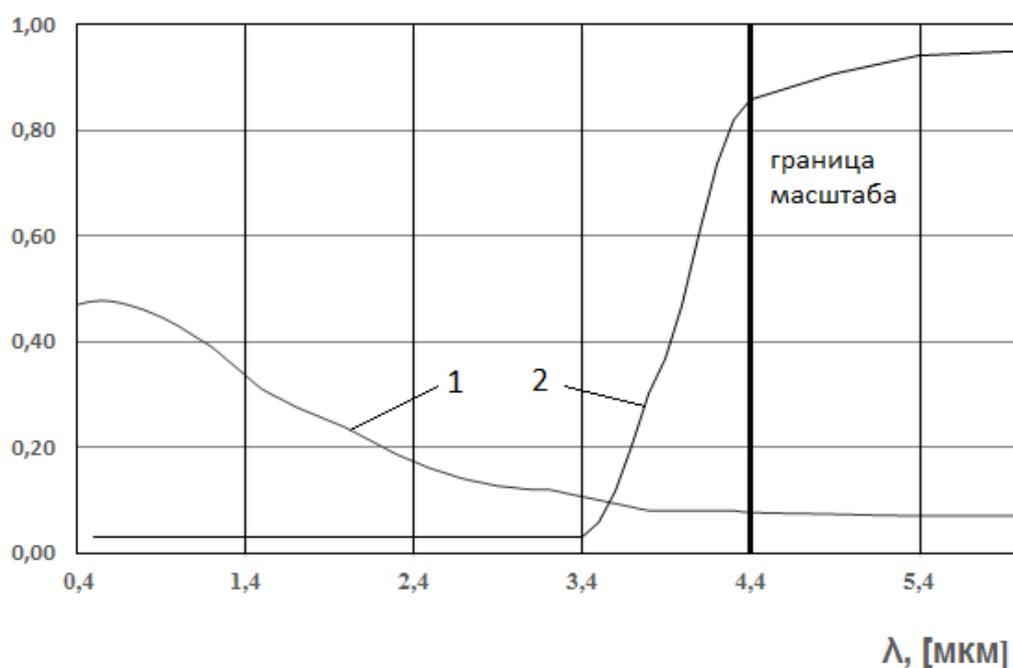


Рисунок 4.4 - Используемая модель спектральной степени черноты 1 - вольфрамовой спирали  $\varepsilon_{\lambda,w}$  и 2 - кварцевой колбы  $\varepsilon_{\lambda,kolb}$

### 4.5.3 Результаты исследования и их обсуждение

Определялись следующие основные радиационные характеристики лампы при различных значениях температуры  $T_w$  ее спирали. Результаты расчетов радиационных характеристик лампы, представлены на графиках рисунков 4.5 – 4.7.

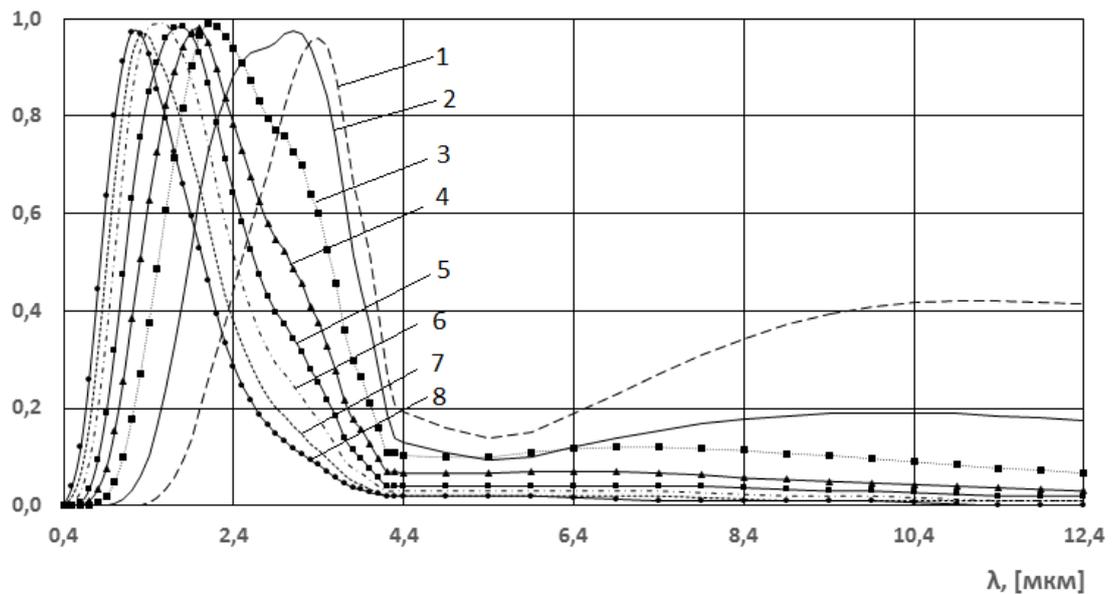


Рисунок 4.5 - Относительная величина спектральной плотности потока, исходящего с поверхности лампы излучения -  $\bar{q}_{\lambda, lamp}(\lambda, T_w)$  при  $\bar{d}=0.5$

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

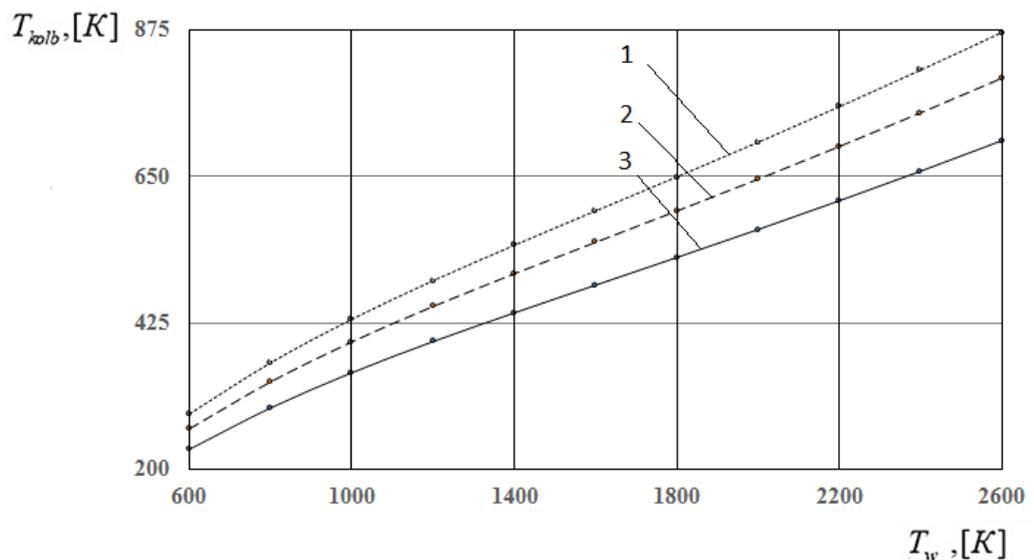


Рисунок 4.6 - Температура колбы лампы  $T_{kolb}(T_w)$  при  $\bar{d}$  равным: 1 – 0.3;

2 – 0.5; 3 – 0.7

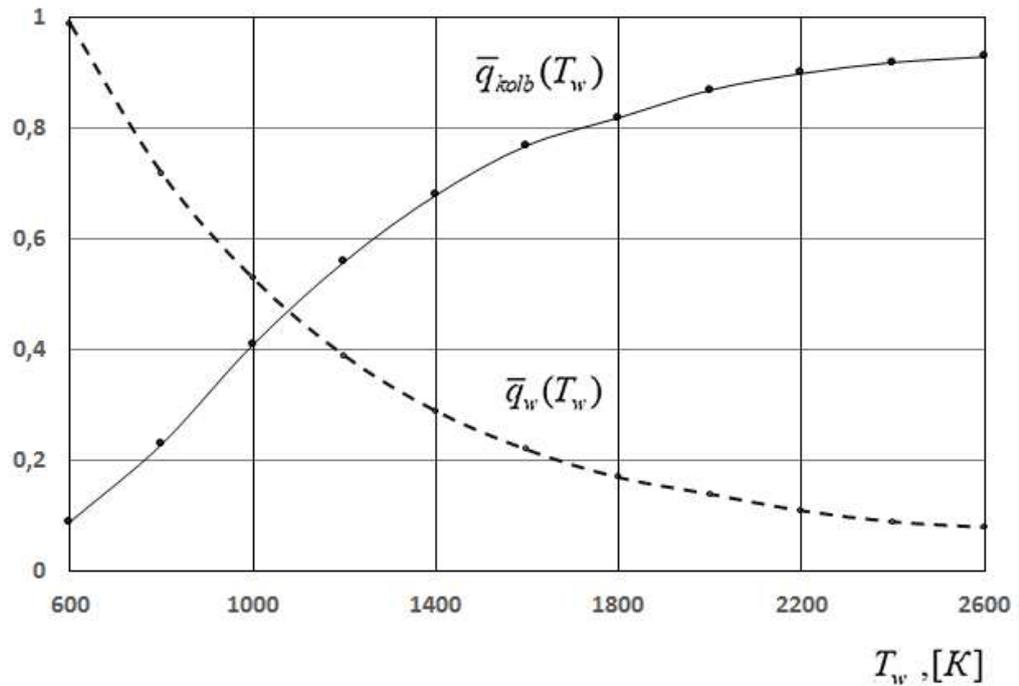


Рисунок 4.7 - Относительные величины плотности потоков излучения, источником которых является спираль и колба -  $\bar{q}_w(T_w) = q_w / q_{lamp}$ ,  $\bar{q}_{kolb}(T_w) = q_{kolb} / q_{lamp}$

Результаты расчета зависимости плотности уходящего с поверхности лампы интегрального потока излучения от температуры спирали  $q_{lamp}(T_w)$  могут служить основой для рассмотрения вопроса об иерархическом положении ламп накаливания с вольфрамовой спиралью в ряду других источников излучения, применяемых в инфракрасных имитаторах внешних тепловых нагрузок на поверхность КА. Из-за особенности характера зависимости спектральной степени черноты вольфрама от длины волны излучения требуемая плотность потока уходящего от лампы излучения может быть получена только при высоких значениях температуры спирали. Под требуемой плотностью понимается плотность потока излучения лампы, при которой имитатор, выполненный в виде совокупности размещаемых вокруг испытуемого объекта ламп, в состоянии обеспечить подвод к поверхности объекта тепловых потоков определенной плотности.

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

Результаты расчета  $q_{имит}$  как функции  $T_w$  относились к характерной величине  $S$ . Полученные зависимости безразмерной величины  $\bar{q}_{имит}(T_w) = q_{имит}(T_w) / S$  от температуры спирали  $T_w \in [600; 2000]$  К при  $n = \{10, 20, 30\}$  представлены на графиках рисунка 4.8. Предполагалось, что относительный диаметр спирали  $\bar{d} = 0,5$ .

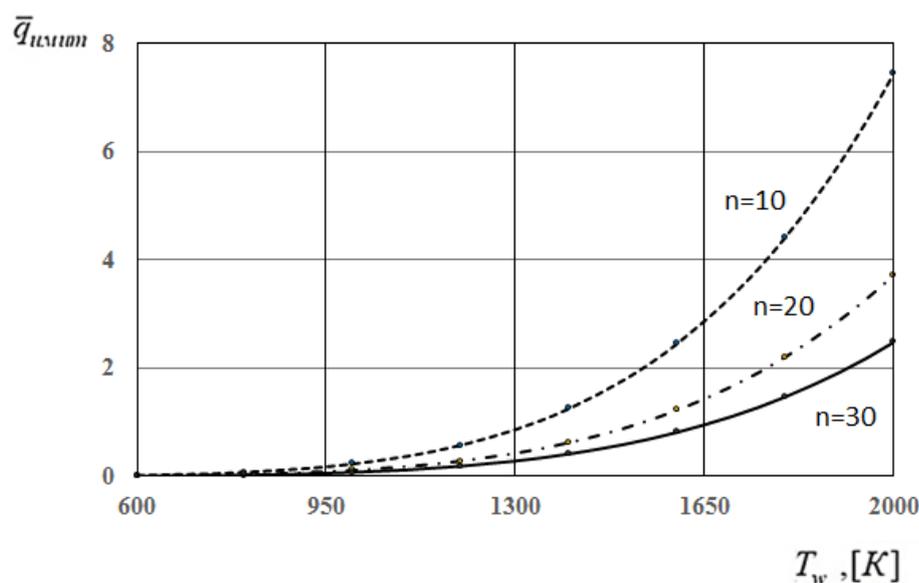


Рисунок 4.8 - Зависимости безразмерной величины  $\bar{q}_{имит}(T_w) = q_{имит}(T_w) / S$  от температуры спирали

Учитывая сильную зависимость величины  $q_{\text{имит}}$  от параметра  $n$ , возникает вопрос о том, на какие значения этого параметра следует ориентироваться при оценке возможного уровня погрешностей моделирования внешних тепловых нагрузок на элементы поверхности КА с неоднородными поглощательными свойствами. В конструкциях известных инфракрасных имитаторов чаще всего реализуются значения  $n \in [10; 30]$ . Так, например, в инфракрасном имитаторе тепловакуумной установки ВК 600/300, где в качестве излучателя используется нагреваемая электрическим током стеклографитовая лента шириной 20 мм, заключенная в широкий (80 мм) отражатель [3, 6],  $n = 10$ . В имитаторах термобарокамер, где используются ГЛН с диаметром колб 10 мм [2],  $n = 30$ . Следует при этом заметить, что в имитаторе с характерным размером, допустим диаметром, превышающим 2 м, невозможно обеспечить реализацию малых значений параметра  $n$  без чрезмерного увеличения числа ламп. При использовании в имитаторе большого количества ламп усложняется система управления имитатором. Поэтому в имитаторе с ламповыми модулями представляется целесообразным принимать значение параметра  $n$  не ниже 20. Но как следует из графиков на рисунка 4.8 при  $n = 20$  величина плотности теплового потока, превышающая значение  $1400 \text{ Вт/м}^2$  может быть достигнута только при  $T_w > 1500 \text{ К}$ .

В работе приводятся результаты исследования уровня возможных погрешностей моделирования с помощью ламп накаливания внешних тепловых нагрузок на поверхность объекта с неоднородными радиационно-оптическими характеристиками, подвергающегося воздействию инфракрасных лучистых потоков, исходящих от источников, испускающих излучение преимущественно в средней и дальней инфракрасной области спектра. Представленные в этой работе результаты свидетельствуют о том, что для некоторых используемых в космической технике материалов и покрытий чрезмерно большие погрешности моделирования могут возникать даже при сравнительно невысоких значениях температуры спирали - не выше 1200 К. Так, например, для белой эмали и кварцевого стекла относительные погрешности, обусловленные несоответствием

спектров излучения лампы и источника внешнего теплового нагружения, уже при  $T_w=1200$  К достигают по модулю величину 0.5, что, очевидно, является недопустимым.

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

## Заключение

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

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

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

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

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

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

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

### **Список сокращений и условных обозначений**

В диссертации используются следующие сокращения и условные обозначения:

**ВК**- вакуумная камера

**ГЛН**- галогенные лампы накаливания

**ИО**- испытуемый объект

**КА**- космический аппарат

**ЭУ**- экспериментальная установка

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

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. – 288 с.
3. Алифанов О.М., Артюхин Е.А., Румянцев С.В. Решение граничных и коэффициентных обратных задач теплопроводности итерационными методами // Теплообмен – VI. – Минск: ИТМО АН БССР, 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. 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.
6. Андрейчук О.Б., Малахов Н.Н. Тепловые испытания космических аппаратов.- М.: Машиностроение, 1982. – 143 с.
7. Борисенко Е.П., Доронин Ю.П., Кондратьев К.Я. Структурные характеристики полей уходящей радиации по данным ИСЗ “Тайрос-II” и “Тайрос-III” и их интерпретация// Космические исследования, 1965. № 3 – С. 433-443
8. 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.
9. Васильев Ф.П. Методы решения экстремальных задач. –М.: Наука, 1981.– 400 с.
10. Васильев Ф. П. Численные методы экстремальных задач. – М.: Наука, 1980.– 520 с.
11. Викулов А.Г., Ненарокомов А.В. Уточнение решения вариационной задачи идентификации математических моделей теплообмена с сосредоточенными параметрами // ТВТ.2019. Т.57 №2. – 234 с.

12. Елисеев В.Н., Товстоног В.А. Теплообмен и тепловые испытания материалов и конструкций аэрокосмической техники при радиационном нагреве – М.: МГТУ им. Баумана, 2014 – 399 с .

13. Залетаев В.М. Собственное излучение Земли на частично экранируемые от нее элементы космических аппаратов.- “Космические исследования”, 1970, т.8, вып.4, – С.636-639.

14. Залетаев В.М., Капинос Ю. В., Сургучев О.В. Расчет теплообмена космического аппарата. – М.:Машиностроение, 1979. – С.46-78.

15. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением/ Пер. с англ. Под ред. Б.А. Хрусталева. – М.: Мир, 1975.– 934 с.

16. Излучательные свойства твердых тел: Справочник /Под общ. ред. А.Б.Шейндлина. -М.: Энергия, 1974. – 472 с.

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

18. 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.

19. 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.

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

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

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

23. 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.

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

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

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

27. 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.

28. 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.

29. 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.

30. Колесников А.В., Палешкин А.В., Сыздыков Ш.О. Оптимизация температурных режимов экранов при моделировании тепловых нагрузок в термобарокамере. // Тепловые процессы в технике. 2016. Т. №9. – С.401 – 407.

31. Колесников А.В., Палешкин А.В., Сыздыков Ш.О. Влияние погрешностей моделирования внешних тепловых потоков на теплоперенос через экранно-вакуумную теплоизоляцию. //Тепловые процессы в технике. 2017. Т. №1. – С.34 – 39.

32. Колесников А.В., Палешкин А.В., Сыздыков Ш.О. Методика расчета облученности элементов испытываемых объектов в ламповых имитаторах внешних тепловых нагрузок. // Тепловые процессы в технике. 2017. Т. 9. №6. – С.267 – 275.

33. Колесников А.В., Палешкин А.В. Численный метод выбора энергетического режима работы сетчатых нагревателей // Труды МАИ. 2010. № 39. (<http://trudymai.ru>)

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

35. Колесников А.В., Палешкин А.В., Сыздыков Ш.О. Методика моделирования тепловых нагрузок на космический аппарат в термобарокамерах с термоэкранами и системой галогенных ламп накаливания. // Инженерно-физический журнал. 2019. Т. 92. №4.

36. Колесников А.В., Палешкин А.В., Сыздыков Ш.О. Перспективы применения галогенных ламп накаливания для моделирования условий внешнего теплообмена космических аппаратов. // Тепловые процессы в технике. 2018 г. Т.10. №3-4. – С.158 – 165.

37. Кравченко С.В. Подходы к созданию комплексных систем для отработки и испытания космических аппаратов.// Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. №1(13). – С.149-175.

38. Малоземов В.В. Тепловой режим космических аппаратов. – М.: Машиностроение, 1980. – 232 с.

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

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

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

42. Палешкин А.В. Исследование и разработка методов моделирования внешнего теплообмена космических аппаратов с помощью инфракрасных источников излучения. 05.07.03:защищена 1.03.2011/Палешкин А.В. – М., 2011.

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

44. Проектирование испытательных стендов для тепловакуумных испытаний космических аппаратов. /А.Г. Галеев, А.В. Колесников, А.В. Палешкин, В.В. Родченко. – М.; Изд-во МАИ, 2015 г.– 204 с.
45. Саммур Н. Техническое описание. Вакуумная камера CLIMATS. 2010
46. Спэрроу Э.М., Сесс Р.Д. Теплообмен излучением. /Пер. с англ. -М.: Энергия, 1971.– 296 с.
47. Теплообмен и тепловой режим космических аппаратов. /Под ред. Дж.Лукаса, пер. с англ. по ред. Н.А.Анфимова. -М.: Мир, 1974. – 543 с.
48. Термовакuumные испытания лунного отсека КА “Аполлон” с использованием конформных управляемых нагревателей. Пер. № 08-484, ГОНТИ-И, 1971.
49. Ульянов В.А., Соловьев М.В. Оптимизация тепловакуумных испытаний космических комплексов на установке ВК 600/300 . «Полет», НИЦ РКП. 2009 г. – С.82-93.
50. Фаворский О.Н., Каданер Я.С. Вопросы теплообмена в космосе –М.: Высшая школа, 1972. – 280 с.
51. 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. – 412 с.
52. AIAA Space Simulation Testing Conference, 1964, 1966
53. Brinkmann P.W. The actual performance of the Large Space Simulator (LSS) at ESA/ESTEC and the validation of its design. Proceedeings of the “Pacific Basin International Symposium on Advances in Space Science Technology and its Applications (PISSTA June 7-10, 1987, Beiging-China.
54. 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
55. Chao B.T., Wedeking G.L. Similarity criteria for thermal modeling of Spacecraft. Journal of Spacecraft and Rockets. 1965, V.2. №2.

56. Gary S. Ash, Ph.D., DynaVac, Hingham, MA, “Manufacturing of Cryoshroud Surfaces for Space Simulation Chambers”, 25th Space Simulation Conference; 20-23 Oct. 2008.

57. Katzoff S. Similitude in Thermal Models of Spacecraft, NASA TN, D-1631, 1963, April.

58. Pollara, R. A., “Improved thermal vacuum chamber temperature performance via gaseous nitrogen Thermal Conditioning Units”, Proceedings of the 2014 European Conference on Spacecraft Structures, Materials and Environmental Testing, April 2014.

59. Santeller D.S., Jones D.W., Holheboer D.H. Vacuum Technology and Space Simulation. NASA, 1966.

60. Transactions of the Third International Vacuum Congress, Volume 1, 1965.

61. 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, 2021. - Vol.4, No 9.

62. Колесников А.В., Палешкин А.В., Шеметова Е.В. Имитаторы тепловых нагрузок с диффузно излучающими модулями в строго ограниченном телесном угле. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. - №4 (121). – С. 47-53

63. Колесников А.В., Шеметова Е.В. Имитаторы тепловых нагрузок с диффузно излучающими в строго ограниченном телесном угле модулями. // Сборник тезисов XLIV Гагаринские чтения, 2018. - С.149

64. Кочетков А.Ю., Шеметова Е.В. Определение работоспособности теплоприёмника суммарного теплового потока ФОА 020 после длительного хранения. // World Science: problems and innovation. Сборник статей XLII Международной научно-практической конференции. Пенза, 2020. – С. 91-95

65. Кочетков А.Ю., Шеметова Е.В. Определение использования теплоприёмников суммарного теплового потока ФОА 020 при проведении тепловакуумных испытаний в термовакуумной камере // Вакуумная техника, материалы и технологии под редакцией С.Б. Нестерова. Российское научно-

техническое вакуумное общество имени академика С.А. Векшинского, 2018. - С. 244-247.

66. Шеметова Е.В. Применение диффузно излучающих систем при тепловакуумной обработке // Сборник тезисов XLIV академических чтений по космонавтике, посвященных памяти С.П. Королёва – пионеров освоения космического пространства. МГТУ им. Баумана, 2020. – Т. 2. – С.317.

67. Кочетков А.Ю., Котляров Е.Ю., Шабарчин А.Ф., Шеметова Е.В. Разработка концепции и расчетно-экспериментальный анализ рабочих характеристик теплообменника-тепломера для проведения тепловакуумных испытаний низкотемпературной полезной нагрузки КА // Вакуумная наука и техника. Материалы XXVIII научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов, 2021. - С.214-222

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

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