

**МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)**

На правах рукописи



Болотная Камилла Игоревна

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ЭКСПЛУАТАЦИИ ИНФРАКРАСНЫХ ИМИТАТОРОВ
ВНЕШНИХ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК НА ПОВЕРХНОСТЬ
КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА**

Специальность

05.07.03 – «Прочность и тепловые режимы ЛА»

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель: д.т.н., с.н.с.

Колесников Анатолий Васильевич



Москва 2016

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. АНАЛИЗ ИЗВЕСТНЫХ И ПЕРСПЕКТИВНЫХ СПОСОБОВ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВНЕШНИХ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК НА ПОВЕРХНОСТЬ КА. ...	12
1.1. Моделирование с использованием имитатора солнечного излучения и имитатора теплового излучения планет.	12
1.2. Приближенное моделирование.	14
1.2.1. Инфракрасные имитаторы модульного типа с линейчатыми излучателями.	14
1.2.2. Инфракрасные имитаторы модульного типа с условно точечными излучателями.	17
1.2.3. Сетчатые нагреватели.	21
1.2.4. Термозкраны.	22
1.2.5. Конформные управляемые электронагреватели.	22
Выводы по главе 1.	24
2. МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ИНФРАКРАСНЫХ ИМИТАТОРОВ.	25
2.1. Исследование различных методов оптимизации режимов работы имитаторов модульного типа и их сравнительный анализ.	25
2.1.1. Метод, основанный на использовании необходимого условия существования экстремума функции многих переменных.	25
2.1.2. Использование градиентных методов минимизации целевой функции.	30
2.1.3. Сравнительный анализ рассмотренных методов.	32
2.2. Определение угловых коэффициентов, входящих в выражение для целевой функции.	39
2.2.1. Универсальный численно-аналитический метод определения угловых коэффициентов.	39
2.2.2. Расчет угловых коэффициентов для имитаторов с линейчатыми излучателями. ...	46
2.2.3. Расчет угловых коэффициентов для имитаторов с сетчатыми нагревателями.	53
Выводы по главе 2.	67
3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ МОДУЛЕЙ ИМИТАТОРА ОТ ПОДВОДИМОЙ К НИМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ.	68

3.2. Методический подход к экспериментальному определению зависимости интенсивности излучения модуля имитатора от подводимой к нему электрической мощности.....	68
3.3. Аналитический подход к определению коэффициента связи между подводимой к модулю имитатора мощностью и интенсивностью его излучения.....	69
Выводы по главе 3.....	71
4. ИЛЛЮСТРАЦИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРАБОТАННОГО МЕТОДИЧЕСКОГО ПОДХОДА К ОПРЕДЕЛЕНИЮ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ИНФРАКРАСНЫХ ИМИТАТОРОВ.....	72
4.1. Решение задачи термостатирования изделия «Спектр-РГ» при проведении его комплексных электрических испытаний.....	73
4.1.1. Геометрическая и радиационная модель инфракрасного имитатора.	73
4.1.2. Геометрическая и радиационная модель испытываемого объекта.....	76
4.1.3. Результаты решения задачи.....	77
4.2. Воспроизведение внешних тепловых нагрузок на изделие «Луна-Глоб» при его тепловакуумных испытаниях в установке ВК600/300.....	84
4.2.1. Задачи, решаемые при тепловакуумных испытаниях изделия.	84
4.2.2. Геометрическая и радиационная модель используемого имитатора.....	85
4.2.3. Геометрическая и радиационная модель испытываемого объекта, используемая для определения энергетического режима работы ИКИ.	87
4.2.4. Анализ внешних тепловых нагрузок, действующих на КА «Луна-Глоб» на окололунной орбите и на поверхности Луны	89
4.2.5. Результаты решения задачи определения режимов работы имитатора.	95
Выводы по главе 4.....	113
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	114
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	115

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, наземная отработка космического аппарата, в частности тепловая, является одним из важнейших этапов его создания. Если проанализировать историю наземной тепловакуумной отработки отечественной космической техники, акцентируя внимание в первую очередь на методический ее аспект, то можно сделать следующий вывод. Во многих случаях тепловакуумная отработка проводилась далеко не рационально с точки зрения материальных затрат. Это происходило, главным образом, по причине недостаточного внимания к качеству разрабатываемого для проведения тепловой отработки методического обеспечения. Это вполне объяснимо, учитывая определенную специфику финансирования в 60е-90е годы прошедшего столетия программ космических исследований. Наблюдалось подчас нецелесообразное, а главное, нерационально продолжительное использование дорогостоящих экспериментальных установок. Не менее эффективную наземную отработку можно было провести при значительно меньших материальных затратах, сконцентрировав внимание на создании качественного методического и программного обеспечения проведения экспериментальных исследований. Необходимо было задействовать в необходимой мере имеющуюся у разработчиков космической техники собственную экспериментальную базу, доработав ее в пределах целесообразной возможности и повысив требования к уровню разработок методического обеспечения экспериментальных исследований.

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

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

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

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 выбор этих установок будет больше и, что немаловажно, влияние на сроки проведения экспериментальных исследований различных организационных факторов сократится.

Анализируя конструктивные, радиационно-оптические, энергетические и теплофизические характеристики известных и доступных для изучения отечественных и зарубежных КА, 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 внешних лучистых тепловых потоков могут

использоваться имитаторы поля лучистых потоков, исходящих от Солнца и планет, а также системы различных источников излучения, размещаемых вокруг испытуемого объекта. При этом следует заметить, что даже при наличии в экспериментальной установке достаточно совершенного имитатора Солнца почти всегда возникает необходимость оснащения этой установки дополнительными средствами внешнего нагрева. Они могут моделировать или воздействие на КА потоков собственного и отраженного солнечного излучения планет, или тепловое влияние на испытуемый объект частей того же аппарата, не вошедшие, чаще всего по причине ограниченности размеров рабочей зоны экспериментальной установки, в состав испытуемого объекта. При необходимости моделирования ситуации, когда КА меняет свою ориентацию относительно направления на Солнце, дополнительные средства могут использоваться и для имитации воздействия на испытуемый объект потоков прямого солнечного излучения. В качестве этих дополнительных средств нагрева используются упрощенные средства – различные по конструкции и по способу подвода энергии. Но они имеют общую особенность – основная энергия испускаемого ими излучения сосредоточена в средней и дальней инфракрасной полосе спектра с длиной λ волны излучения, превышающей 2-3 мкм, где спектральная поглощательная способность подавляющего большинства наружных покрытий КА слабо зависит от длины волны падающего излучения. В этом заключается основное преимущество инфракрасных имитаторов перед другими. Но практическое использование таких имитаторов сопряжено с необходимостью преодоления больших трудностей, связанных с выбором таких энергетических режимов эксплуатации этих имитаторов, при реализации которых обеспечивалась бы требуемая точность моделирования тепловых нагрузок. Трудности обусловлены тем, что такие имитаторы не воспроизводят параметры поля излучения источников, тепловое воздействие которых на поверхность КА они призваны воспроизводить во время испытаний. С их помощью

воспроизводят лишь расчетные значения внешних тепловых нагрузок, источником которых, как уже отмечалось, могут быть Солнце, тепловое излучение планет и т.п. Возникает сложная задача управления энергетическими характеристиками имитаторов, заключающаяся в определении и реализации таких режимов эксплуатации их излучающих элементов, при которых расчетные внешние тепловые нагрузки воспроизводились бы наилучшим образом, разумеется, в рамках возможностей применяемой имитационной системы. Используемые методы оптимизации энергетических режимов работы инфракрасных имитаторов не в полной мере удовлетворяют потребностям практики. Возникает необходимость в их совершенствовании. Практика применения инфракрасных имитаторов выдвинула ряд задач, которые необходимо решать с целью повышения качества и усовершенствования технологии проведения тепловых экспериментов.

Цель работы

Целью является разработка методов определения энергетических режимов работы инфракрасных имитаторов, обеспечивающих более высокую, по сравнению с известными, точность моделирования внешних тепловых нагрузок на поверхность космического аппарата.

Основные решаемые задачи

1. Совершенствование методического подхода к решению задачи выбора оптимальных, в отношении точности моделирования тепловых нагрузок, энергетических режимов работы имитаторов и исследование вопроса о единственности решения.

2. Определение зависимости между подводимой к модулям имитаторов электрической мощностью и интенсивностью их излучения с целью обеспечения технической возможности реализации выявленных оптимальных режимов работы имитаторов.

3. Разработка более простого и удобного в использовании метода решения задачи экспериментального моделирования внешних тепловых нагрузок с помощью сетчатых нагревателей.

4. Исследование возможности создания инфракрасных имитаторов с условно точечными излучателями, имеющими преимущества в отношении точности имитации при сложной форме поверхности испытуемого объекта.

Научная новизна

1. Установлено наличие не одного, а нескольких минимумов целевой функции, характеризующей погрешности воспроизведения заданных тепловых нагрузок на элементы поверхности испытуемого объекта при испытаниях с использованием имитаторов с дискретными источниками излучения.
2. Разработаны экспериментальный и аналитический методы определения коэффициентов связи между подводимой к линейчатому модулю имитатора электрической мощностью и интенсивностью его излучения.
3. Разработан новый метод расчета облученности поверхности испытуемых объектов излучающими нитями сетчатых нагревателей.
4. Разработана принципиальная схема условно точечного модуля инфракрасного имитатора, основанного на использовании галогенных кварцевых ламп накаливания как источников энергии для излучающей черной рабочей поверхности модуля.

Практическое значение работы

Результаты работы использовались на НПО им. С.А. Лавочкина:

1. Для подготовки методического и программного обеспечения решения задачи термостатирования изделия «Спектр-РГ» при проведении его комплексных электрических испытаний в тепловакуумной установке ВК600/300.

2. Градиентные методы оптимизации – при подготовке методического обеспечения тепловакуумных испытаний изделия «Луна-Глоб» в установке ВК600/300.

3. Разработанный новый подход к расчету облученности нитями сетчатых нагревателей плоских поверхностей испытываемых объектов – при подготовке автономных испытаний небольших фрагментов изделий, создаваемых на предприятии НПО им. С.А. Лавочкина.

Публикации

Основные результаты работы опубликованы в 4 статьях в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК по специальности 05.07.03 «Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов».

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения и списка использованных источников из 69 наименований; содержит 120 стр. основного текста, 20 рисунков, 6 таблиц.

В первой главе анализируются различные способы физического моделирования внешних тепловых нагрузок на поверхность КА. Эти способы можно разделить на два класса:

1) Воспроизведение в рабочем объеме экспериментальной установки полей излучения Солнца и планет по основным их параметрам – угловому распределению интенсивности и спектральному составу излучения.

2) Приближенные способы моделирования, при реализации которых воспроизводятся расчетные величины тепловых потоков, поглощаемых элементами поверхности КА в штатных условиях эксплуатации. При анализе приближенных методов моделирования внешних тепловых нагрузок рассматривались имитаторы модульного типа с условно линейчатыми излучателями, имитаторы на основе сетчатых нагревателей, термоэкраны,

конформные управляемые электронагреватели. Помимо анализа перечисленных имитационных средств в главе большое внимание уделяется вопросу о возможности создания инфракрасного имитатора на основе галогенных кварцевых ламп накаливания как удобного в эксплуатации источника тепловой энергии. Приводится описание принципиальной схемы модуля такого имитатора.

Во второй главе диссертации проводится сравнительное исследование методических подходов к решению задачи определения оптимальных энергетических режимов работы инфракрасных имитаторов. Режим работы имитатора обычно характеризуется совокупностью значений интенсивности излучения его элементов (модулей) в направлении своих нормалей, то есть величинами $J_j(0)$ $j = 1...n$, где n - число излучателей.

В качестве критерия оптимальности режима работы имитатора выбирается минимум целевой функции ψ , представляющей собой сумму квадратов «взвешенных» погрешностей воспроизведения расчетных значений внешних тепловых потоков к выделенным тепловоспринимающим элементам испытываемого объекта.

Рассматривались два подхода к решению задачи определения оптимального режима работы инфракрасных имитаторов. Оба подхода основаны на поиске вектора $J(0) = \{J_j, j = 1, 2...n\}$, минимизирующего функцию ψ . При использовании первого подхода искомый вектор определяется из условия минимума функции ψ как функции многих переменных. Представленный в диссертационной работе второй подход основан на использовании градиентных методов минимизации целевой функции ψ - метода наискорейшего спуска и метода сопряженных градиентов.

Проведен сравнительный анализ этих подходов. Установлено, что градиентные методы оптимизации и метод, основанный на использовании необходимого условия существования экстремума функции многих переменных, дают мало отличающиеся результаты по погрешностям

моделирования тепловых нагрузок. Но положение точек минимума целевой функции отличается весьма существенно, что свидетельствует о наличии у минимизируемой (целевой) функции не одного минимума.

В выражения для минимизируемых целевых функций входят угловые коэффициенты, поэтому в работе значительное внимание уделяется методам определения угловых коэффициентов между тепловоспринимающими элементами испытываемого объекта и элементами излучающих модулей имитаторов.

В третьей главе диссертации излагаются экспериментальный и аналитический подходы к определению зависимости интенсивности излучения модулей имитаторов от подводимой к ним электрической мощности. Необходимость решения такой задачи возникает в связи с тем, что рассмотренные в предыдущей главе методы минимизации целевой функции позволяют выявить лишь абсолютные и относительные значения интенсивностей излучения модулей имитатора, обеспечивающих минимальное значение целевой функции. Но для реализации оптимального значения вектора $J(0) = \{J_j(0), j = 1, 2, \dots, n\}$ необходимо знать связь между интенсивностью излучения модулей имитатора и подводимой к ним электрической мощностью.

В четвертой главе демонстрируются возможности разработанных подходов к выбору оптимальных энергетических режимов работы инфракрасных имитаторов на примере использования известного инфракрасного имитатора (ИКИ) тепловакуумной установки ВК600/300 для решения задачи термостатирования изделия «Спектр-РГ» при проведении комплексных его электрических испытаний и для воспроизведения внешних тепловых нагрузок на изделие «Луна-Глоб» при его тепловакуумных испытаниях.

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

1. АНАЛИЗ ИЗВЕСТНЫХ И ПЕРСПЕКТИВНЫХ СПОСОБОВ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВНЕШНИХ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК НА ПОВЕРХНОСТЬ КА.

В данной главе диссертации анализируются различные способы физического моделирования внешних тепловых нагрузок на поверхность КА. Эти способы можно разделить на два класса:

1) Воспроизведение в рабочем объеме экспериментальной установки полей излучения Солнца и планет по основным их параметрам – угловому распределению интенсивности и спектральному составу излучения.

2) Приближенные способы моделирования, при реализации которых не воспроизводятся поля излучения источников внешнего теплового нагружения КА, а воспроизводятся лишь расчетные величины тепловых потоков, поглощаемых элементами поверхности КА в штатных условиях эксплуатации.

1.1. Моделирование с использованием имитатора солнечного излучения и имитатора теплового излучения планет.

Моделирование внешних тепловых нагрузок с использованием имитаторов солнечного излучения и имитаторов поля излучения планет в ряде случаев является трудноразрешимой задачей не только в техническом, но и в методическом отношении. Сложности обусловлены тем, что часто возникает необходимость воссоздания в экспериментальной установке нестационарных во времени и в пространстве лучистых полей, формируемых одновременно и Солнцем и планетой, например, Землей. По ряду причин технического характера имитатор солнечного излучения является неподвижным. Следовательно, для воспроизведения возможного изменения ориентации испытуемого объекта относительно потока солнечного излучения необходимо оснащение тепловакуумной установки устройствами, позволяющими поворачивать испытуемый объект, по крайней мере,

относительно двух осей. Кроме того, при неподвижном имитаторе Солнца имитируемое поле излучения планеты также должно изменять свою ориентацию, что может быть достигнуто либо за счет поворота всего имитатора излучения планеты, либо за счет использования специального и очень сложного имитатора (существующего только в научных разработках) с модулями, оснащенными приводами.

Таким образом, экспериментальное исследование теплового состояния КА в условиях, максимально приближенным к натурным, сопряжено с большими трудностями, несмотря на то, что имитационная техника позволяет воспроизводить в экспериментальной установке и поле излучения Солнца, и поле излучения планет (в соответствии с принятыми радиационными моделями) в отдельности. Но необходимая при проведении испытаний техническая организация совместной работы имитационных систем и испытуемого объекта нередко является неразрешимой задачей. Поэтому большое значение приобретают приближенные методы моделирования внешних тепловых нагрузок, которые реализованы в известных имитаторах: в имитаторах модульного типа с линейчатыми излучателями, имитаторах на основе сетчатых нагревателей, системах термоэкранов, конформных управляемых электронагревателей. Эти методы и анализируются в следующем разделе данной главы. Но помимо анализа перечисленных известных имитационных средств, в разделе большое внимание уделяется вопросу о возможности создания инфракрасного имитатора с условно точечными излучающими модулями, в состав которых входят галогенные кварцевые лампы накаливания, используемые как удобный в эксплуатации источник тепловой энергии.

1.2. Приближенное моделирование.

1.2.1. Инфракрасные имитаторы модульного типа с линейчатыми излучателями.

Имитаторы выполняются чаще всего в виде совокупности линейчатых модулей, располагающихся вдоль образующих поверхности кругового цилиндра и на торцевых панелях ферменной конструкции [10,31-34,44].

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

В качестве излучателей могут применяться токопроводящие и нагреваемые электрическим током ленты, полые керамические стержни с вмонтированными в них электронагревателями, тонкостенные трубы с наружными проволочными нагревателями, сетчатые нагреватели, инфракрасные кварцевые лампы накаливания, в которых основным источником инфракрасного излучения являются кварцевые колбы и т.п.

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

Геометрическая форма отражателей определяется типом излучателя, технологическими и производственными возможностями реализации, а также некоторыми соображениями методического характера, в первую очередь, стремлением не ухудшать качество моделирования радиационных свойств космического пространства. Поверхность отражателя может иметь плоскую, или форму цилиндрической поверхности с различной формой направляющей линии. К отражателям не предъявляются особые требования по формированию индикатрис излучения, отличающихся от диффузных. С экономической точки зрения предпочтительны отражатели, обеспечивающие испускание модулями энергии излучения только в направлении рабочей зоны

установки. Если рассматривать вопрос об использовании отражателей не только в экономическом аспекте, но и с учетом влияния их на точность моделирования идеальных поглотительных свойств космического пространства, то определенного вывода при комплексном рассмотрении вопроса получить не удастся. Связано это с тем, 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. Но практика эксплуатации имитаторов рассматриваемого класса с модулями, в состав которых входят отражатели с площадью выходного сечения, в несколько раз превышающей площадь поверхности излучателя, свидетельствует о появлении в установке в ряде случаев потоков фонового излучения с недопустимо большой плотностью. В этих случаях использование отражателей представляется нецелесообразным, а для уменьшения потерь энергии можно использовать экранно-вакуумную теплоизоляцию на основе никелевой фольги, экранирующую излучатель с тыльной стороны, то есть со стороны криогенных экранов.

Рассматриваемые имитаторы привлекательны своей относительной конструктивной простотой и экономичностью и при достаточно большом числе автономно запитываемых излучающих модулей позволяют с хорошей точностью воспроизводить монотонно изменяющиеся по поверхности объекта внешние тепловые нагрузки. Монотонный характер изменения этих нагрузок может быть обусловлен совокупным влиянием таких факторов, как гладкость и выпуклость формы наружных поверхностей, однородность их радиационных характеристик, монотонность распределения по поверхности падающих в условиях штатной эксплуатации тепловых потоков. В случае

объектов с вогнутой формой или неоднородными характеристиками наружных поверхностей, а также в случае немонотонного характера распределения внешних тепловых нагрузок по поверхности объекта, возникают существенные погрешности имитации, подчас большие. Эти погрешности обусловлены чрезмерно большим удлинением их модулей (по сравнению с расстоянием до испытываемого объекта), что предопределяет назначение таких имитаторов как имитаторов расчетного теплового воздействия на объекты преимущественно с линейчатой формой внешних поверхностей.

На приведенном ниже рисунке 1.1 в качестве примера представлена заимствованная из [62] схема инфракрасного имитатора с условно линейчатыми излучателями, установленными на цилиндрическом каркасе и в торцевых плоскостях.

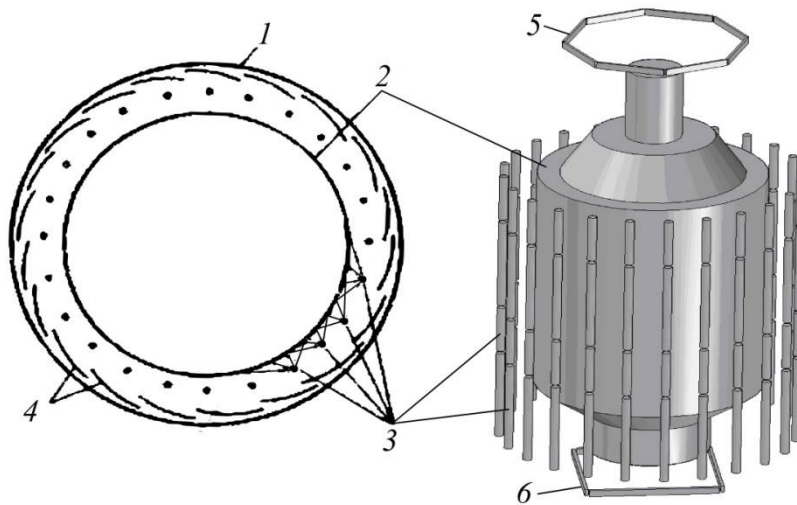


Рис.1.1. Схема ИКИ с линейными источниками лучистой энергии:

1 – стенка камеры, 2- объект испытаний, 3 – боковые излучатели, 4 – азотные экраны, 5, 6 – торцевые излучатели

1.2.2. Инфракрасные имитаторы модульного типа с условно точечными излучателями.

Применяемые в крупных тепловакуумных установках инфракрасные имитаторы имеют, как правило, условно линейчатые излучатели. Такой тип излучателей сужает область эффективного применения инфракрасных имитаторов, в то время как имитаторы с условно точечными излучателями имели бы перед ними преимущество, когда испытуемый объект имеет сложную форму наружной поверхности. Поэтому актуальной является задача создания имитатора с условно точечными излучателями, в котором бы с использованием удобных в эксплуатации источников энергии обеспечивался подвод этой энергии к излучающим элементам модуля, испускающим в сторону испытуемого объекта излучение в инфракрасной полосе спектра.

В идеале излучатели таких имитаторов должны представлять плоскую черную пластину, размеры которой малы по сравнению с расстоянием до испытываемого объекта. Но возникает проблема подвода тепловой энергии к этой пластине, температура которой может быть достаточно велика (до 1000К). Возможен, конечно, подвод энергии с помощью электрической спирали, прикрепляемой с внутренней стороны пластины, но в этом случае возникают конструктивные сложности, связанные с организацией подвода энергии, обеспечением электроизоляции и теплоизоляции внутренней стороны излучающей пластины и т.д.

Из всех известных источников излучения наиболее противоречивыми являются кварцевые галогенные лампы накаливания. Благодаря широкому применению в светотехнике, технологии, экспериментальной технике, при проведении прочностных и тепловых испытаний теплонагруженных конструкций кварцевые галогенные лампы накаливания серийно выпускаются нашей промышленностью и за рубежом в широком ассортименте. Они как источники излучения обладают бесспорными достоинствами, такими как относительная простота в эксплуатации, высокая

светоотдача, отсутствие загрязняющих эффектов от нагревательных элементов. Однако эти источники имеют неблагоприятную для использования их в инфракрасных имитаторах специфику, которая заключается в том, что спектральный состав излучения, испускаемого лампами, оказывается более приближенным к солнечному, нежели к инфракрасному. В силу этой особенности эти лампы бесспорно можно применять в рассматриваемых имитаторах в том случае, когда наружная поверхность испытуемого объекта является серой, то есть когда спектральная поглотительная способность элементов поверхности объекта не зависит от длины волны излучения. Но, тем не менее, в литературе кварцевые галогенные лампы накаливания довольно настойчиво представляются как удобные источники излучения для инфракрасных имитаторов внешних тепловых нагрузок. Такое отношение к кварцевым галогенным лампам представляется ошибочным, поскольку спектральный состав таких ламп формируется за счет сложного теплообмена в излучающей системе, включающей в себя запитываемую электрическим током вольфрамовую нить накала, заполняющий колбу горячий газ (аргон и пары йода), кварцевую колбу, которая, обладая высокой пропускательной способностью в коротковолновой области теплового спектра $\lambda \in (0,2; 2,5)$ мкм и низкой пропускательной способностью в инфракрасной области спектра ($\lambda > 3$ мкм) сама нагревается и становится заметным источником излучения в средневолновой части инфракрасной области спектра. Поэтому спектр излучения кварцевых галогенных ламп можно условно рассматривать как совокупность трех составных частей, смещенных относительно друг друга по длине волны λ . Относительная доля этих частей и степень смещения будут изменяться в зависимости от температуры вольфрамовой спирали и, следовательно, от подводимой к лампе электрической мощности. Поэтому для несерых тепловоспринимающих поверхностей испытуемого объекта данное обстоятельство неизбежно приведет к появлению погрешностей

воспроизведения в эксперименте расчетных внешних тепловых нагрузок и, следовательно, к погрешностям экспериментального определения теплового состояния испытуемого объекта.

Приведенные выше соображения относительно особенностей спектрального состава кварцевых галогенных ламп накаливания носят качественный характер. Поэтому вопрос о целесообразности использования таких ламп заслуживает более тщательного рассмотрения.

Однако кварцевые галогенные лампы можно использовать в составе инфракрасных имитаторов с условно точечными источниками излучения, если излучающий модуль выполнить в соответствии с радиационно-оптической схемой, изображенной на рисунке 1.2. В состав модуля могут входить две-три параллельно запитываемые лампы типа КГМ-220-1000, отражатели и излучатель.

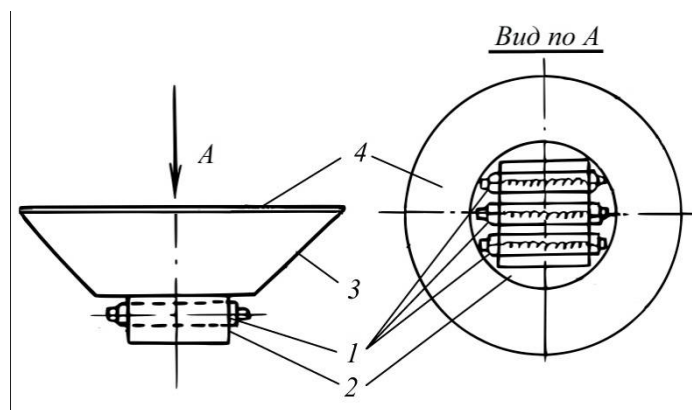


Рис. 1.2. Принципиальная схема модуля имитатора.

1 – источник лучистой энергии (лампы КГМ- 220-1000), 2 – отражатель, 3 – стакан отражателя, 4 – конический диффузор.

Использование в одном модуле двух-трех параллельно запитываемых ламп мощностью по 1000 Вт каждая и размещение их в стакане 2 так, что цоколи и периферийные части колб выходят за пределы излучающей полости, позволит обеспечить выполнение одного из необходимых условий эксплуатации кварцевых галогенных ламп накаливания – температура цоколей ламп не должна превышать 700 К. При наличии нескольких ламп реализовать экстремальный (максимальный) режим работы модуля можно

будет, эксплуатируя лампы на щадящем режиме, то есть, подводя к каждой из них мощность, значительно меньшую 1000 Вт.

Конструкции стакана, где размещаются лампы, и отражателя могут быть различными. Главное – это обеспечить с наименьшими потерями передачу энергии излучения ламп к черному по своим радиационным характеристикам плоскому излучателю 4, экранирующему полость, образованную стаканом и отражателем 3. Излучатель, который может быть выполнен в виде теплопроводного диска или прямоугольной пластины, предназначен для преобразования совершенно неопределенного, кардинальным образом зависящего от подводимой мощности спектра излучения ламп в спектр излучения серого (почти черного) тела. Это даст возможность с высокой точностью определять интенсивность излучения модуля и спектральный состав этого излучения по информации о температуре излучателя и даже по информации о подводимой к модулю электрической мощности.

Модули рассматриваемого имитатора могут устанавливаться на каркасе ферменной конструкции. Каркас может иметь различную форму, например, форму призмы с полностью открытым верхним основанием и с плоской ферменной конструкцией нижнего основания (см. рис. 1.3).

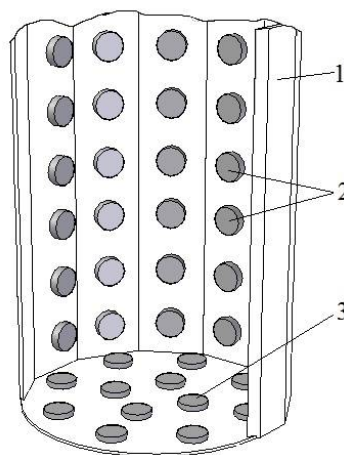


Рис. 1.3. Схема размещения условно точечных источников излучения на каркасе имитатора.

1 – каркас имитатора; 2 – модули, расположенные на боковой поверхности; 3 – торцевые модули.

Число боковых граней каркаса может быть различным, например 12. Модули размещаются вдоль центральных линий боковых граней каркаса, а на нижней торцевой поверхности имитатора располагаются вдоль касательных, окружностям, например, к двум с радиусами R_1 и R_2 ($R_1 > R_2$).

1.2.3. Сетчатые нагреватели.

Излучатели, выполненные в виде токопроводящих сеток, устанавливаются в непосредственной близости от тех участков поверхности испытываемого объекта, на которые эти излучатели должны воспроизводить расчетные внешние тепловые нагрузки [44]. Сетки выполняются в виде совокупности параллельно расположенных и последовательно запитываемых проводов из нихрома. Провода натягиваются на рамки, выполненные из неэлектропроводного материала, например текстолита. При этом диаметр проводов, по крайней мере, в десять раз меньше расстояния между соседними проводами.

Достоинством данного способа моделирования внешнего теплового воздействия является то, что такие излучатели не изменяют теплофизические и радиационные свойства облучаемой поверхности и в незначительной степени экранируют эту поверхность. Но данному способу присущи такие очевидные недостатки, которые сужают область его применения до выполнения всего лишь вспомогательных функций при наличии какого-то другого основного способа моделирования внешнего теплообмена КА. Достаточно отметить хотя бы два из этих недостатков.

1) Если поверхность испытываемого объекта имеет непростую конфигурацию, то весьма сложно, а может и невозможно, будет разместить в непосредственной близости от его поверхности совокупность плоских сетчатых электронагревателей, каждый из которых оказывал бы лучистое

тепловое воздействие лишь на определенную ограниченную часть поверхности объекта и не влиял бы на соседние участки поверхности.

2) При близком расположении сетчатого нагревателя от облучаемой поверхности испытываемого объекта шаг между излучающими нитями часто бывает соизмерим с расстоянием до облучаемого объекта, что может привести к появлению недопустимой неоднородности в плотности падающего излучения.

1.2.4. Термоэкраны.

Судя по литературным источникам [68,69] возрастает интерес к термобарокамерам, оснащенным специальными термоэкранами, на поверхности которых может устанавливаться температура в диапазоне от T_{\min} до T_{\max} . Обычно $T_{\min} \in (-180^{\circ}\text{C}; -130^{\circ}\text{C})$, $T_{\max} \approx 150^{\circ}\text{C}$. Установка и поддержание температур экранов на нужном уровне осуществляется с помощью агрегатов термостатирования газообразного азота, в состав которых входят вентилятор, обеспечивающий подачу газообразного азота в теплообменники термоэкранов, и электронагреватели. Эти экраны предназначены, в основном, либо для термостатирования испытываемого объекта при определенном уровне температур, либо для приближенного моделирования тепловых нагрузок на поверхность испытываемого объекта.

1.2.5. Конформные управляемые электронагреватели.

Для воспроизведения расчетных внешних тепловых нагрузок на поверхность испытываемого объекта иногда применялись и применяются так называемые конформные управляемые нагреватели [7,52-56,58], называемые часто поверхностными, пленочными электронагревателями, и даже нагревательными рубашками. При их использовании наружная поверхность испытываемого объекта условно разбивается на какое-то число характерных

частей, на каждой из которых внешние тепловые условия можно считать одинаковыми по поверхности. На выделенных участках в зависимости от их конструктивных особенностей применяют следующие способы воспроизведения определенного расчетным путем теплового воздействия:

1) На наружной поверхности секций электронагревателей обеспечиваются такие же значения степени черноты, что и на поверхности соответствующей части КА, на которые эти нагреватели устанавливаются, чаще всего наклеиваются. Электрическая мощность, подводимая к нагревателю, соответствует величине поглощенного этим участком поверхности КА внешнего теплового потока.

2) С помощью поверхностных электронагревателей воспроизводятся расчетные значения наружных температур.

3) Электрические нагреватели устанавливаются под теплоизоляцией на корпусе изделия и с их помощью воспроизводятся расчетные величины теплопритоков к соответствующим элементам корпуса КА. Последний способ применяется только тогда, когда монтаж электронагревателей на наружной поверхности теплоизоляции КА затруднен, а также когда у КА имеется много выносных агрегатов, навесных блоков, связанных в тепловом отношении с корпусом испытываемого объекта.

Рассматриваемые конформные электронагреватели нашли применение в практике тепловой отработки КА, благодаря ряду присущих им положительных качеств. Во-первых, с их помощью можно проводить тепловакуумные испытания КА при небольших относительных размерах экспериментальной установки. Во-вторых, электронагреватели представляют собой хорошо управляемый экономичный источник тепловой энергии, поэтому с их помощью можно воспроизводить тепловое воздействие источников лучистой энергии в космосе даже для КА, совершающих произвольные угловые перемещения относительно последних.

Однако рассматриваемому способу воспроизведения расчетных внешних тепловых потоков присущи очень серьезные недостатки, ограничивающие область его применения:

1) Сложна и громоздка система управления подводимой к электронагревателям мощности. Так, например, для тепловых испытаний лунного посадочного модуля КА «Аполлон» потребовалось обеспечение управления 480 секциями электронагревателей [52,27,61].

2) Для каждого КА необходимо проектирование и изготовление секций электронагревателей, а затем сравнительно долгая подготовка объекта к испытаниям.

3) С помощью электронагревателей часто не удается воспроизвести с надлежащей точностью расчетные значения внешнего теплового потока к элементам КА, на которых затруднен монтаж нагревателей.

4) Во многих случаях существенно изменяются теплофизические характеристики элементов КА, на которых устанавливаются электронагреватели.

Выводы по главе 1.

1. Экспериментальное моделирование тепловых режимов КА в условиях, максимально приближенным к натурным, сопряжено с подчас непреодолимыми трудностями, вызванными необходимостью технической организации совместной работы имитационных систем экспериментальной установки и испытуемого объекта. В связи с этим большое значение имеют приближенные методы моделирования внешнего теплообмена КА.

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

2. МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ИНФРАКРАСНЫХ ИМИТАТОРОВ.

Практическое использование инфракрасных имитаторов модульного типа сопряжено с необходимостью преодоления больших трудностей, связанных с выбором таких энергетических режимов эксплуатации этих имитаторов, при реализации которых обеспечивалась бы требуемая точность моделирования тепловых нагрузок. Трудности обусловлены тем, что эти имитаторы не воспроизводят параметры поля излучения источников, тепловое воздействие которых на поверхность КА они призваны воспроизводить во время испытаний. С их помощью воспроизводят лишь расчетные значения внешних тепловых нагрузок, источником которых могут быть Солнце, тепловое излучение планет, излучение, исходящее от тех частей КА, которые не вошли в состав испытываемого объекта по причине ограниченности размеров рабочей зоны экспериментальной установки или по другим причинам.

Возникает сложная задача управления их энергетическими характеристиками, заключающаяся в определении и реализации таких режимов эксплуатации их излучающих элементов, при которых расчетные внешние тепловые нагрузки воспроизводились бы наилучшим образом, разумеется, в рамках возможностей применяемой имитационной системы.

2.1. Исследование различных методов оптимизации режимов работы имитаторов модульного типа и их сравнительный анализ.

2.1.1. Метод, основанный на использовании необходимого условия существования экстремума функции многих переменных.

В известном методическом подходе энергетический режим работы имитатора характеризуется совокупностью значений интенсивности

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

В работах [31-34,62,63] излагается простой, но эффективный подход к решению задачи определения оптимального, в отмеченном выше смысле, энергетического режима работы имитатора модульного типа с линейчатыми излучателями. Подход основан на использовании общеизвестного метода наименьших квадратов и необходимого условия существования экстремума функции многих переменных [10]. Суть его заключается в следующем. Режим работы имитатора характеризуется совокупностью значений интенсивности излучения его элементов (модулей) в направлении своих нормалей – величиной вектора $J(0) = J_j(0); j = 1...n$, где n - число модулей. Выбор вектора $J(0)$ в качестве оптимизируемой энергетической характеристики модулей обусловлен тем, что компоненты этого вектора (величины $J_j(0)$) являются выходными функциями модулей и зависят не только от подводимой к ним мощности и конструкции модулей, но и от радиационных характеристик их отражающих поверхностей (если в состав модулей входят отражатели), режима работы вакуумной и криогенной систем установки. Хотя контроль величин $J_j(0)$ является непростой задачей,

однако для каждой конкретной радиационно-оптической схемы и конструкции модуля имитатора и заданной тепловакуумной камеры можно установить зависимость между $J_j(0)$ и другими проще контролируруемыми параметрами модулей, например, подводимой к модулю электрической мощностью.

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

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

Геометрическую модель испытываемого объекта может задаваться одним из двух способов.

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

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

грани. Центральные точки треугольных граней определяются как точки пересечения их медиан. Затем геометрические характеристики элементов аппроксимирующих многогранных поверхностей преобразуются в систему координат x, y, z , связанную с экранами. Алгоритм реализации такого подхода описан в работах [34,46] и реализован в процессе работы над диссертацией в виде компьютерной программы. Заметим, что при введении геометрической модели поверхности испытуемого объекта вторым способом мы в итоге получаем информацию о координатах и ориентации элементарных площадок, расположенных в центральных точках треугольных граней.

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

Каждому из этих элементов присваивается, в зависимости от требуемой точности воспроизведения внешней тепловой нагрузки, определенный весовой коэффициент b_i ($i = 1, 2, \dots, N$). В качестве критерия оптимальности режима работы имитатора в отмеченных работах выбирается минимум целевой функции ψ , представляющей собой сумму квадратов «взвешенных» погрешностей Δq_i воспроизведения расчетных значений q_i^0 внешних тепловых потоков к выделенным тепловоспринимающим элементам. Величина Δq_i равна разности между плотностью потока q_i излучения, поглощаемого i -ым элементом в условиях экспериментальной установки и заданным значением плотности теплового потока q_i^0 , подводимого по расчетам к выделенным элементам в штатных условиях эксплуатации. При этом $q_i = \sum_{j=1}^n \pi \cdot A_{di-j} \cdot \Phi(\vec{r}) \cdot \varphi_{di-j} \cdot J_j(0)$, где A_{di-j} - интегральная поглощательная способность i -го элемента по отношению к излучению j -го излучателя ; φ_{di-j} - локальный угловой коэффициент i -го элемента и j -го излучателя; $\Phi(\vec{r})$ - индикатриса излучения; \vec{r} - единичный вектор, направленный от j -го излучателя к i -му элементу; n - число излучателей.

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

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

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

$$J_j(0) \geq 0, \quad J_j(0) \leq J_{MAX} \quad (2.2) \quad \text{где } J_{MAX} - \text{максимально допустимая величина интенсивности излучения, зависящая от типа излучателей.}$$

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

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

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

2.1.2. Использование градиентных методов минимизации целевой функции.

Второй подход к решению задачи определения оптимального режима работы инфракрасных имитаторов основан на использовании градиентных методов минимизации целевой функции ψ , а именно – метода наискорейшего спуска и метода сопряженных градиентов.

Суть этого подхода заключается в следующем. Пусть $q^0 = (q_1, q_2, \dots, q_N)$ – вектор заданных значений плотности теплового потока в заданных точках поверхности испытуемого объекта.

$J(0) = (J_1(0), J_2(0), \dots, J_n(0))$ – вектор управления. Будем выбирать вектор $J(0)$ из условия определенной согласованности вектора q^0 с вектором q значений плотности тепловых потоков, поглощаемых тепловоспринимающими элементами испытуемого объекта в условиях облучения его модулями рассматриваемого имитатора. При этом

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

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

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

Данная задача в экстремальной постановке сводится к минимизации невязки, то есть функции $\psi(J(0))$. Воспользуемся итерационным алгоритмом оптимизации вектора $J(0)$: $J^{(k+1)}(0) = J^{(k)}(0) + \Delta J^{(k)}(0)$, при этом $J^{(0)}(0)$ – начальное приближение искомого вектора, задаваемое в значительной степени произвольно. В качестве приращения $\Delta J^{(k)}$ при переходе к следующему приближению используется вектор $\Delta J^{(k)} = -\beta^{(k)} \cdot I^{(k)}$, где $I^{(k)}$ –

векторная величина, определяющая направление перехода от вектора $J^{(k)}(0)$ к вектору $J^{(k+1)}(0)$ (направление спуска), а $\beta^{(k)}$ – скалярная величина, характеризующая длину шага вдоль этого направления (глубину спуска). Направление спуска можно определять одним из двух известных методов: методом скорейшего спуска или методом сопряженных градиентов.

При использовании метода скорейшего спуска направление спуска определяется вектором, противоположным градиенту функционала $\psi(J(0))$, то есть противоположным вектору $\psi'(J(0)) = (\partial\psi/\partial J_1(0), \partial\psi/\partial J_2(0), \dots, \partial\psi/\partial J_n(0))$. При

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

величины $\beta^{(k)}$, то ее целесообразней всего определять численно. А именно: увеличивая $\beta^{(k)}$ от некоторого малого значения с каким-то малым шагом, осуществляем расчет величины целевой функции ψ , следя за тем, чтобы при выбранном направлении спуска величина этой функции стала наименьшей. Значение $\beta^{(k)}$, при котором достигается минимум $\psi(J)$, и является оптимальной глубиной спуска при переходе от вектора $J^{(k)}(0)$ к вектору $J^{(k+1)}(0)$.

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

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

точке k , а $\gamma^{(k)} = -\frac{\psi'(J^{(k)}) \cdot (\psi'(J^{(k-1)}) - \psi'(J^{(k)}))}{(\psi'(J^{(k-1)}))^2}$. Следует отметить, что $S^{(0)}$

принимается равным градиенту целевой функции в точке, соответствующей начальному приближению вектора $J^{(0)}(0)$.

Оптимизация вектора $J(0)$ осуществляется по такому же итерационному алгоритму, что и в случае использования метода скорейшего спуска: $J^{(k)}(0) = J^{(k-1)} - \beta^{(k-1)} \cdot S^{(k-1)}$.

2.1.3. Сравнительный анализ рассмотренных методов.

Два метода градиентного типа, а также известный метод оптимизации вектора $J(0)$, основанный на использовании необходимого условия существования экстремума функции многих переменных, были реализованы в виде программы (Фортран), 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° .

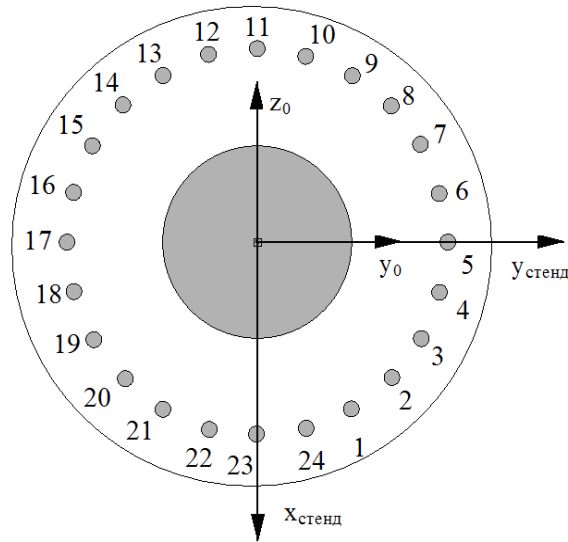


Рис. 2.1. Схема размещения модулей ИКИ

Если относить все размеры имитатора и испытуемого объекта к диаметру D имитатора, то относительная высота h имитатора принималась равной $\frac{3}{2}$. В качестве испытуемого объекта рассматривалась поверхность кругового цилиндра с относительным диаметром $\frac{d}{D} = 0,5$ и относительной высотой $\frac{h}{D} = 1$. Поверхность испытуемого объекта 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 [63].

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

Условимся называть ниже подход к решению задачи, основанный на использовании необходимого условия существования экстремума функции многих переменных, первым подходом, подход, основанный на использовании метода скорейшего спуска – вторым, а подход, где используется метод сопряженных градиентов – третьим.

С использованием упоминаемой выше программы проведены расчеты оптимальных значений интенсивности излучения модулей имитатора и погрешностей моделирования расчетных внешних тепловых нагрузок с помощью трех сопоставляемых подходов. Хотя полученные в результате расчетов значения интенсивности излучения модулей имитатора существенной смысловой нагрузки не несут, но, тем не менее, их целесообразно ниже привести в виде таблиц 1-3, чтобы обнаружить

существенную разницу в распределении интенсивности излучения, следовательно, и в распределении электрической мощности, подводимой к модулям имитатора.

Таблица 1

Значения интенсивности излучения [$\text{Вт}/\text{м}^2$ стерад.], полученные с помощью первого подхода.

Номер пояса	Порядковые номера модулей имитатора							
	1-9-17	2-10-18	3-11-19	4-12-20	5-13-21	6-14-22	7-15-23	8-16-24
1	9178,29	2040,44	15590,38	10747,49	1474,83	5962,59	0,00	0,00
	3692,67	0,00	1680,56	3563,91	0,00	0,00	4984,04	0,00
	1616,63	1217,07	0,00	0,00	12462,15	0,00	6835,21	16000,00
2	7172,89	8720,74	4348,54	5406,15	5486,56	3547,37	0,00	0,00
	2232,30	1037,34	1198,58	1125,84	1198,37	1764,03	0,00	2504,79
	383,80	2581,55	0,00	0,00	3739,89	8830,07	3674,91	6830,87
3	10176,04	4771,03	8486,00	5067,23	6476,02	2506,10	0,00	0,00
	2232,27	1775,91	0,00	2835,76	0,00	1473,29	1609,61	1530,57
	0,00	2887,53	0,00	0,00	5094,79	6781,42	4774,00	6579,14
4	6398,18	7618,56	6434,75	6953,96	3788,45	4097,12	0,00	0,00
	2379,91	969,86	984,67	1906,92	476,01	1850,52	677,90	1673,68
	1487,66	1139,59	0,00	0,00	7115,32	4035,08	6689,66	8798,31
5	2271,55	10861,17	5775,32	1722,27	11511,06	0,00	0,00	0,00
	2784,14	1039,28	849,73	1636,59	769,11	1979,55	0,00	2549,31
	201,42	2740,05	0,00	0,00	7015,55	4256,20	1836,25	11848,35
6	16000,00	146,67	16000,00	8921,41	0,00	6877,69	0,00	0,00
	4150,80	0,00	0,00	5117,01	0,00	0,00	3013,82	2856,60
	0,00	1380,64	0,00	913,90	6724,20	4545,07	16000,00	4206,84

Таблица 2

Значения интенсивности излучения [$\text{Вт}/\text{м}^2$ стерад.], полученные с помощью второго подхода

Номер пояса	Порядковые номера модулей имитатора							
	1-9-17	2-10-18	3-11-19	4-12-20	5-13-21	6-14-22	7-15-23	8-16-24
1	9119,57	7580,12	1455,87	1598,87	1226,25	1559,50	823,88	6559,71
	9006,25	5659,44	851,90	1900,18	1371,62	1125,84	2252,02	8321,05
	8709,77	3498,72	1382,39	1631,07	1715,65	845,59	4540,37	9106,43

2	7603,41	6226,90	0,00	985,22	1003,24	1454,69	37,77	7948,22
	6994,76	5399,92	0,00	966,30	1094,60	1284,72	242,67	3455,63
	6504,98	3148,15	2325,41	1737,44	1452,28	2017,96	4511,62	8265,67
3	7492,14	5962,96	0,00	1758,29	1213,65	1104,55	0,00	6654,82
	7346,41	4988,89	0,00	732,58	1212,98	1123,29	103,88	5434,45
	6787,55	3475,03	2024,62	1401,05	1329,64	2138,18	4692,94	7234,58
4	7000,83	6233,14	0,00	1727,46	1262,95	1309,84	0,00	4051,97
	6607,53	5029,07	0,00	532,22	1116,55	1254,37	0,00	5009,54
	6777,65	3377,82	2045,92	1520,90	1261,31	1384,67	7653,58	9806,33
5	6832,46	6895,76	0,00	978,47	1087,29	1601,08	0,00	4246,42
	6421,71	5747,82	0,00	1184,42	1054,02	1506,11	0,00	3174,07
	6710,39	2477,21	2499,77	162,04	1324,83	1960,34	6976,55	9817,01
6	8962,53	7347,69	1333,52	1525,43	1237,08	1615,32	355,00	7857,79
	8741,50	5230,97	996,28	1708,76	1390,98	1124,37	1984,90	9522,83
	8554,12	3068,63	1480,34	1538,63	1715,49	539,96	4937,59	9492,24

Таблица 3.

Значения интенсивности излучения [$\text{Вт}/\text{м}^2$ стерад.], полученные с помощью третьего подхода

Номер пояса	Порядковые номера модулей имитатора							
	1-9-17	2-10-18	3-11-19	4-12-20	5-13-21	6-14-22	7-15-23	8-16-24
1	6059,23	4785,69	1836,29	1072,51	852,42	711,13	661,27	4858,50
	5766,59	3778,18	711,94	1014,76	838,90	747,28	1814,70	5948,78
	5435,66	2678,19	985,54	1196,09	792,80	661,98	3253,30	6250,59
2	9969,69	7849,94	566,70	1059,44	1497,51	1719,06	218,04	8614,99
	8488,04	6544,39	743,34	878,38	1476,35	2420,00	1221,86	3394,49
	8243,82	2676,46	1979,15	2154,51	1662,01	1218,67	5088,38	9932,88
3	6573,09	6609,74	1459,43	647,99	874,85	1542,68	128,36	6533,01
	6110,53	4828,36	389,30	1660,17	797,60	1260,70	854,12	5979,28
	6290,12	1523,86	1439,57	1587,08	1318,82	906,66	4146,55	7429,75
4	7287,22	6236,16	1385,46	1559,85	811,45	1058,39	57,63	3888,76
	6426,08	5191,47	300,11	991,64	917,50	1461,92	2005,72	4247,35
	6491,85	1833,95	1270,88	1527,51	1370,03	719,03	6119,66	8669,07
5	9915,25	5783,09	882,06	1143,20	1558,36	1933,01	393,14	5577,56
	6580,42	6582,78	523,84	1193,42	1503,67	1658,64	1577,30	4202,96
	8666,82	2232,33	1562,66	2098,80	1824,61	988,01	6292,79	11324,35
6	6283,10	4812,62	2064,41	843,19	914,01	884,33	475,24	5222,61
	5994,09	3635,97	652,54	924,40	899,83	871,19	2028,07	6238,39
	5604,61	2288,55	1862,73	1003,56	832,45	694,30	3623,71	6480,82

Результаты расчета погрешностей моделирования заданного распределения плотности поглощаемого поверхностью испытываемого объекта

теплового потока представлены на графиках рисунков 2.2- 2.4. Погрешности приводятся для 6 равноотстоящих друг от друга поперечных сечений цилиндрической поверхности $z/h = \{0, 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0\}$, где z отсчитывается от нижней торцевой плоскости. В каждом сечении находятся центральные точки 48 элементарных граней аппроксимирующей поверхности. На графиках кривые 1;2;3;4;5;6 соответствуют приведенным выше значениям $z/h = 0; 0,2; \dots; 1,0$. На графиках по оси абсцисс откладываются номера i точек в каждом сечении $i = 1; 2; \dots; 48$, а по оси ординат отношение абсолютных погрешностей Δq к характерной величине $q_{хар} = 460 \text{ Вт}/\text{м}^2$.

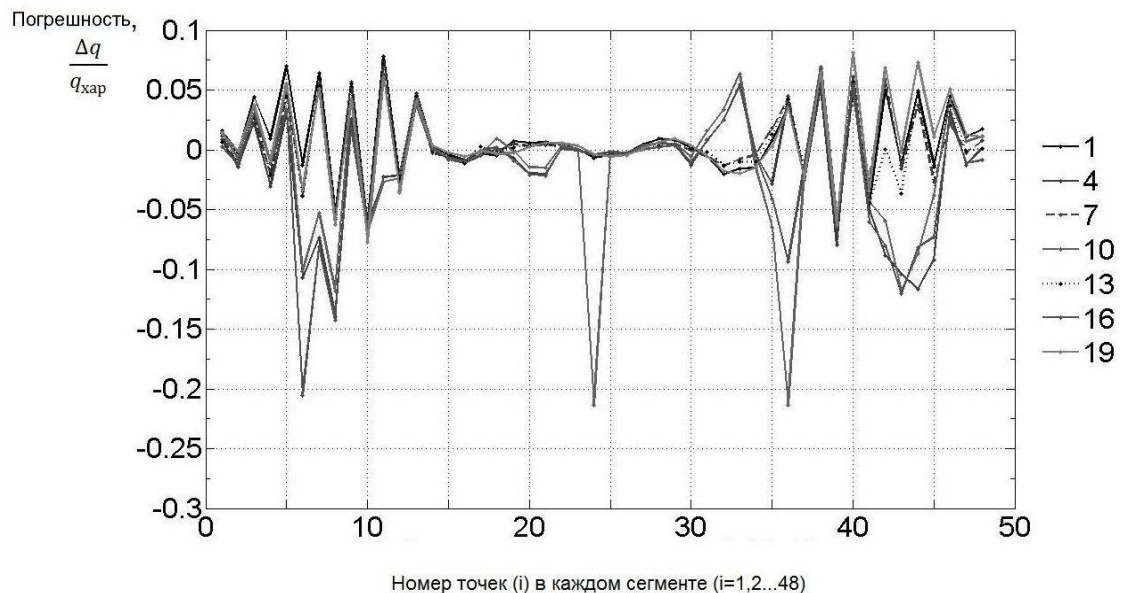


Рис.2.2. Погрешности воспроизведения заданных тепловых нагрузок при использовании для оптимизации режима работы имитатора необходимого условия существования экстремума функции многих переменных.

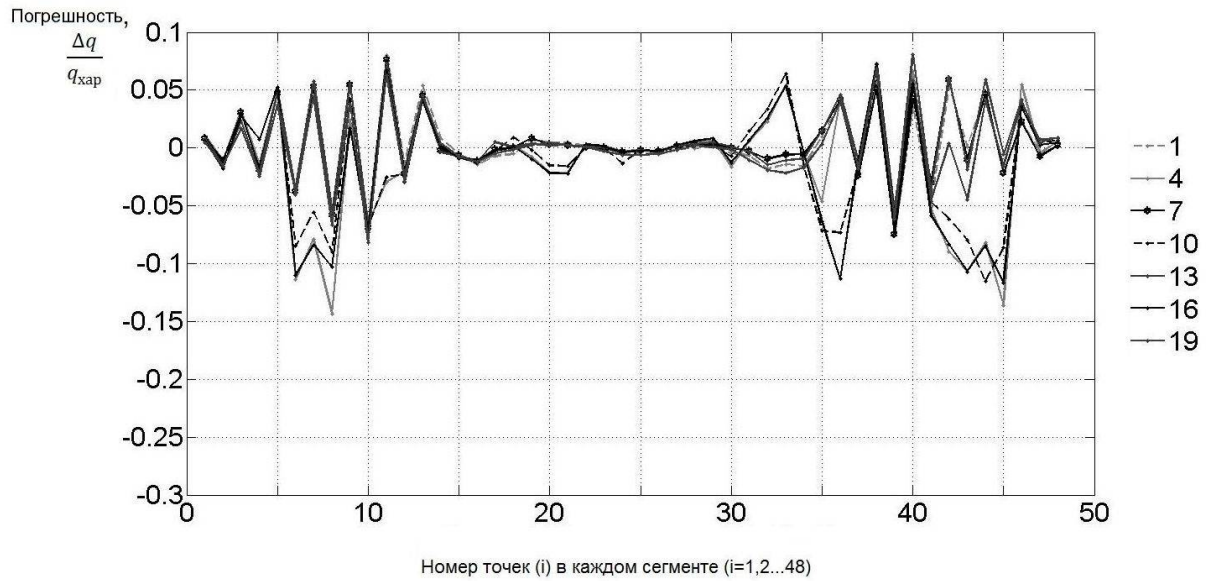


Рис.2.3. Погрешности воспроизведения заданных тепловых нагрузок при использовании для оптимизации режима работы имитатора метода скорейшего спуска.

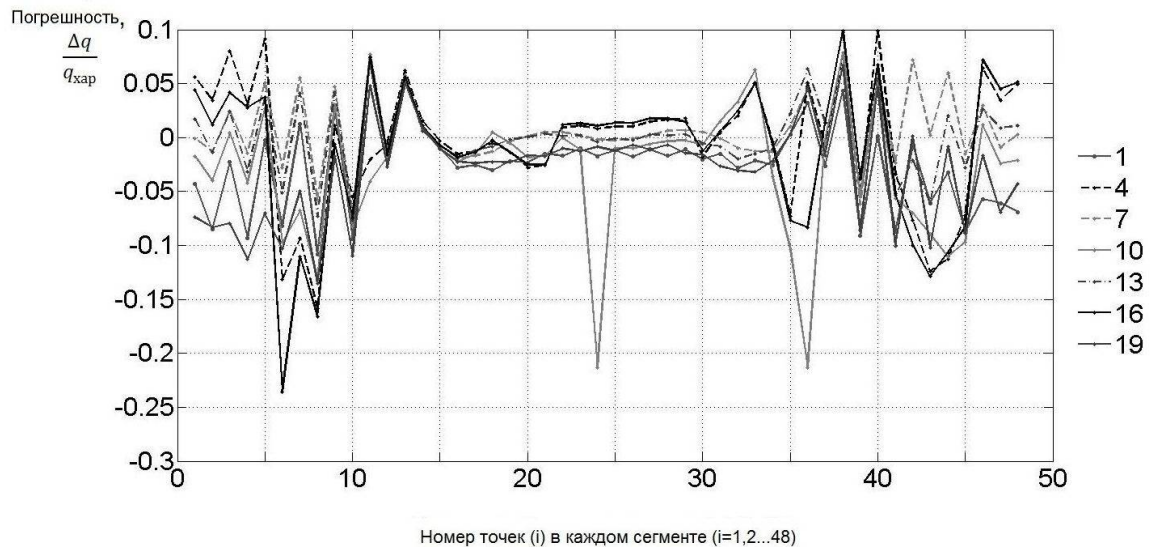


Рис.2.4. Погрешности воспроизведения заданных тепловых нагрузок при использовании для оптимизации режима работы имитатора метода сопряженных градиентов.

Из графиков следует, что для трех рассматриваемых случаев локальные погрешности заметно отличаются. Однако, как показывает расчет, среднеинтегральные (d_{int}) и среднеквадратичные ($dkwd$) погрешности практически не отличаются. В случае применения первого

метода оптимизации $d_{int} = -0,0008$, $dkwd = 0.419$. При использовании второго метода $d_{int} = -0,0009$, $dkwd = 0,423$. Для третьего метода $d_{int} = -0.0014$, $dkwd = 0,449$. Это свидетельствует о том, что градиентные методы оптимизации и метод, основанный на использовании необходимого условия существования экстремума функции многих переменных, дают практически одинаковые результаты по погрешностям. При этом значения минимума целевой функции для трех сопоставляемых методов мало отличаются друг от друга. Но, как следует из сопоставления таблиц 1 – 3, точки минимума (значения вектора $J(0)$, при котором функция ψ принимает минимальное значение) существенно отличаются. Это свидетельствует об отсутствии единственности решения рассматриваемой задачи, то есть о наличии у целевой функции нескольких минимумов.

2.2. Определение угловых коэффициентов, входящих в выражение для целевой функции.

В выражения для целевой функции и ее градиента входят угловые коэффициенты между тепловоспринимающими элементами испытуемого объекта и излучающими элементами имитатора.

В трех последующих разделах рассматриваются методы определения этих коэффициентов.

2.2.1. Универсальный численно-аналитический метод определения угловых коэффициентов.

При рассмотрении радиационного теплообмена в геометрически сложных системах расчет угловых коэффициентов должен осуществляться с учетом возможного взаимного затенения участвующих в теплообмене поверхностей. В данном разделе излагается численно-аналитический подход к определению угловых коэффициентов с учетом возможного взаимного

затенения участвующих в теплообмене элементов имитатора и испытуемого объекта.

Участвующие в лучистом теплообмене поверхности исследуемого объекта заменяются многогранными поверхностями с треугольными гранями. В общем случае это может быть теплообмен поверхности испытуемого объекта с источниками излучения, имитирующими тепловые потоки от Солнца, планеты и т.д., а также теплообмен одних поверхностей КА с другими, если они в силу своего взаимного расположения обмениваются лучистой энергией.

Число граней N у той части поверхности объекта, для которой осуществляется расчет распределения локальной плотности $q(F)$ падающих лучистых потоков, должно быть достаточно большим, чтобы в пределах каждой грани величину $q(F)$ можно было бы считать постоянной величиной и, кроме того, можно было бы достаточно точно учесть эффект возможного взаимного затенения. Другие поверхности объекта, которые являются потенциальными затенителями для рассматриваемой его части, могут аппроксимироваться многогранными поверхностями с небольшим числом граней. Главное, чтобы аппроксимирующая поверхность создавала такой же затеняющий эффект для рассматриваемой части объекта, как и реальная поверхность. Аппроксимацию можно осуществить, задав в какой-то удобной системе координат координаты характерных точек, которые станут вершинами треугольных граней. Для каждой из N граней определяются направляющие косинусы нормалей \bar{n}_i и координаты центральных точек M_i . В качестве этих точек принимаются точки пересечения медиан. Процедуры нумерации граней, определения направляющих косинусов их нормалей и определения координат центральных точек весьма упрощается, если точки на поверхности задавать в виде рядов точек с одинаковым числом в каждом ряду.

Аппроксимация поверхностей исследуемого объекта многогранными поверхностями создает предпосылки для эффективного использования при расчете угловых коэффициентов для треугольных граней метода контурного интегрирования дифференциального углового коэффициента [11]. К числу этих предпосылок можно отнести то, что в любом случае для других целей будут вычисляться направляющие косинусы нормалей граней, координаты вершин граней и координаты их центральных точек. При этом вычислительный алгоритм для Φ_{i-j} имеет весьма простой вид, и его реализация требует относительно небольших затрат компьютерного времени. Допустим, например, что нормаль центральной элементарной площадки i -ой грани имеет направляющие косинусы l_i, m_i, p_i , а координатами центральной точки этой площадки являются x_i, y_i, z_i , тогда

$$\Phi_{i-j} = \frac{l_i}{2\pi} \cdot \oint_L \frac{(z - z_i) \cdot dy - (y - y_i) \cdot dz}{\rho^2} + \frac{m_i}{2\pi} \cdot \oint_L \frac{(x - x_i) \cdot dz - (z - z_i)}{\rho^2} + \frac{p_i}{2\pi} \cdot \oint_L \frac{(y - y_i) \cdot dx - (x - x_i) \cdot dy}{\rho^2} \quad (2.3)$$

где $\rho^2 = (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2$, L - контур j -ой грани - треугольника с известными координатами вершин; x, y, z - текущие координаты контура L - сторон треугольника. Заметим, что угловой коэффициент между i -ым элементом и j -той гранью не равен 0 только в том случае, когда косинус угла между нормальными i -ой и j -ой граней имеет положительный знак, а также когда между этими гранями нет экранирующих поверхностей, то есть нет затенения.

Однако, прежде чем воспользоваться рекомендуемым для вычисления Φ_{i-j} выражением, необходимо решить вопрос о наличии или отсутствии экранирования тепловоспринимающего элемента di от излучения, исходящего от j -го элемента. Если экранирование имеет место, то очевидно, что $\Phi_{i-j} = 0$. Если экранирование отсутствует, то Φ_{i-j} вычисляется в соответствии с приведенными выше рекомендациями. Вопрос о наличии или

отсутствии экранирования решается следующим образом. Определяются точки пересечения вектора \vec{r}_{i-j} с плоскостями всех граней, которые могут экранировать излучение, испускаемое j -ой гранью в направлении i -ой грани. При этом вектор \vec{r}_{i-j} - вектор, имеющий начало в центральной точке i -ой грани, а конец - в центральной точке j -ого элемента. Если точка пересечения вектора с плоскостью грани окажется в пределах соответствующей грани, то можно сделать вывод о том, что затенение имеет место. Если точка пересечения окажется вне пределов соответствующих граней (треугольников), то это является свидетельством отсутствия затенения.

Для составления алгоритма решения задачи обнаружения взаимной затеняемости граней запишем в системе координат xuz уравнение прямой, проходящей через центральные точки i -ой и j -ой граней (точки $M_i(x_i, y_i, z_i)$ и $M_j(x_j, y_j, z_j)$). Тогда уравнение прямой, проходящей через две заданные точки M_i и M_j , можно записать в координатной форме:

$$\begin{cases} x = x_i + (x_j - x_i) \cdot t \\ y = y_i + (y_j - y_i) \cdot t \\ z = z_i + (z_j - z_i) \cdot t \end{cases} \quad (2.4)$$

где t - параметр.

Составим теперь уравнение плоскости интересующей нас грани многогранной поверхности. Допустим, что грань ограничена точками $P_1(\tilde{x}_1, \tilde{y}_1, \tilde{z}_1)$, $P_2(\tilde{x}_2, \tilde{y}_2, \tilde{z}_2)$, $P_3(\tilde{x}_3, \tilde{y}_3, \tilde{z}_3)$. В этом случае уравнение плоскости, проходящей через три заданные точки, можно записать следующим образом:

$$\begin{vmatrix} x - \tilde{x}_1 & y - \tilde{y}_1 & z - \tilde{z}_1 \\ \tilde{x}_2 - \tilde{x}_1 & \tilde{y}_2 - \tilde{y}_1 & \tilde{z}_2 - \tilde{z}_1 \\ \tilde{x}_3 - \tilde{x}_1 & \tilde{y}_3 - \tilde{y}_1 & \tilde{z}_3 - \tilde{z}_1 \end{vmatrix} = 0 \quad (2.5)$$

Раскрывая стоящий в левой части уравнения (2.3) определитель 3-го порядка, приведем это уравнение к общему виду, т.е. к виду

$$A \cdot x + B \cdot y + C \cdot z + D = 0 \quad (2.6.)$$

Для данного случая:

$$\begin{aligned}
 A &= \tilde{y}_1 \cdot (\tilde{z}_2 - \tilde{z}_3) - \tilde{y}_2 \cdot (\tilde{z}_1 - \tilde{z}_3) + \tilde{y}_3 \cdot (\tilde{z}_1 - \tilde{z}_2), \\
 B &= \tilde{z}_1 \cdot (\tilde{x}_2 - \tilde{x}_3) - \tilde{z}_2 \cdot (\tilde{x}_1 - \tilde{x}_3) + \tilde{z}_3 \cdot (\tilde{x}_1 - \tilde{x}_2), \quad (2.7) \\
 C &= \tilde{x}_1 \cdot (\tilde{y}_2 - \tilde{y}_3) - \tilde{x}_2 \cdot (\tilde{y}_1 - \tilde{y}_3) + \tilde{x}_3 \cdot (\tilde{y}_1 - \tilde{y}_2), \\
 D &= -(A \cdot \tilde{x}_1 + B \cdot \tilde{y}_1 + C \cdot \tilde{z}_1).
 \end{aligned}$$

Определим координаты точки пересечения (x_0, y_0, z_0) рассматриваемых прямой и плоскости. Значение параметра t , соответствующего точке пересечения прямой и плоскости выражается через координаты точек M_1, M_2, P_1, P_2, P_3 с помощью известного в курсе аналитической геометрии соотношения:

$$t_0 = -\frac{A \cdot x_1 + B \cdot y_1 + C \cdot z_1 + D}{A \cdot (x_2 - x_1) + B \cdot (y_2 - y_1) + C \cdot (z_2 - z_1)}, \quad (2.8)$$

а координаты точки пересечения, следовательно, определяются совокупностью следующих выражений:

$$\begin{cases}
 x_0 = x_1 + (x_2 - x_1) \cdot t_0 \\
 y_0 = y_1 + (y_2 - y_1) \cdot t_0 \\
 z_0 = z_1 + (z_2 - z_1) \cdot t_0
 \end{cases} \quad (2.9)$$

Чтобы выявить, находится ли точка пересечения M_0 в пределах отрезка $M_1 M_2$, сравним сумму расстояний от точки M_0 до точек M_1 и M_2 с расстоянием между точками M_1, M_2 .

При этом:

$$\begin{aligned}
 |M_1 M_2| &= \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}, \\
 |M_0 M_2| &= \sqrt{(x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 + (z_2 - z_0)^2}, \\
 |M_0 M_1| &= \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + (z_1 - z_0)^2}. \quad (2.10)
 \end{aligned}$$

Если $|M_0 M_1| + |M_0 M_2| > |M_1 M_2|$, то это означает, что плоскость грани пересекается с прямой $M_1 M_2$ за пределами отрезка $[M_1 M_2]$. Затенения в этом случае нет. Если $|M_0 M_1| + |M_0 M_2| = |M_1 M_2|$, пересечение есть, но определенно можно говорить лишь о пересечении отрезка только с плоскостью грани.

Чтобы выяснить, находится ли точка пересечения в пределах анализируемой грани, ограниченной сторонами P_1P_2 , P_2P_3 , P_3P_1 , сопоставим площадь треугольника $P_1P_2P_3$ ($F_{\Delta P_1P_2P_3}$) с суммой площадей треугольников $M_0P_1P_2$, $M_0P_1P_3$, $M_0P_2P_3$. В случае равенства отмеченной суммы величине площади треугольника $P_1P_2P_3$, можно утверждать, что точка пересечения находится в пределах рассматриваемой грани или на ее границе. Если сумма площадей окажется больше $F_{\Delta P_1P_2P_3}$, пересечения с гранью $P_1P_2P_3$ нет и, следовательно, затенения тоже нет. Что касается того случая, когда точка пересечения находится на сторонах треугольника, то он имеет место для всех граней с одной вершиной, совпадающей с центром рассматриваемого тепловоспринимающего элемента. Поэтому при реализации данной методики выявления затенения в компьютерной программе необходимо учитывать данное обстоятельство, исключая, например, из рассмотрения отмеченные грани.

Величины сопоставляемых площадей можно определить, исходя из геометрического смысла векторного произведения векторов, выходящих из какой-то вершины треугольника и оканчивающихся в двух других вершинах этого треугольника, например, векторов $\vec{P_1P_2}$ и $\vec{P_1P_3}$.

Векторное произведение этих векторов $\left[\vec{P_1P_2} \quad \vec{P_1P_3} \right]$, как известно, можно представить в виде определителя 3-го порядка, 1-ую строку которого образуют орты $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$, а вторую и третью строки – координаты перемножаемых векторов.

$$\left[\vec{P_1P_2} \quad \vec{P_1P_3} \right] = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \tilde{x}_2 - \tilde{x}_1 & \tilde{y}_2 - \tilde{y}_1 & \tilde{z}_2 - \tilde{z}_1 \\ \tilde{x}_3 - \tilde{x}_1 & \tilde{y}_3 - \tilde{y}_1 & \tilde{z}_3 - \tilde{z}_1 \end{vmatrix}$$

Координаты вектора, равного векторному произведению векторов, можно определить, раскрыв приведенный определитель по элементам 1-ой строки. Вычислив корень квадратный из суммы квадратов координат этого

вектора, получим удвоенную площадь треугольника $P_1P_2P_3$. В итоге для $F_{\Delta P_1P_2P_3}$ получим:

$$\begin{aligned}
4 \cdot F_{\Delta P_1P_2P_3}^2 &= ((\tilde{y}_2 - \tilde{y}_1) \cdot (\tilde{z}_3 - \tilde{z}_1) - (\tilde{z}_2 - \tilde{z}_1) \cdot (\tilde{y}_3 - \tilde{y}_1))^2 + \\
&+ ((\tilde{z}_2 - \tilde{z}_1) \cdot (\tilde{x}_3 - \tilde{x}_1) - (\tilde{x}_2 - \tilde{x}_1) \cdot (\tilde{z}_3 - \tilde{z}_1))^2 + \\
&+ ((\tilde{x}_2 - \tilde{x}_1) \cdot (\tilde{y}_3 - \tilde{y}_1) - (\tilde{y}_2 - \tilde{y}_1) \cdot (\tilde{x}_3 - \tilde{x}_1))^2
\end{aligned} \tag{2.11}$$

Опуская простые рассуждения и упрощающие выкладки, приведем расчетные формулы для площадей других сопоставляемых треугольников, т.е. треугольников $M_0P_1P_2$, $M_0P_1P_3$ и $M_0P_2P_3$:

$$\begin{aligned}
4 \cdot F_{\Delta M_0P_1P_2}^2 &= ((\tilde{y}_2 - \tilde{y}_1) \cdot (z_0 - \tilde{z}_1) - (\tilde{z}_2 - \tilde{z}_1) \cdot (y_0 - \tilde{y}_1))^2 + \\
&+ ((\tilde{z}_2 - \tilde{z}_1) \cdot (x_0 - \tilde{x}_1) - (\tilde{x}_2 - \tilde{x}_1) \cdot (z_0 - \tilde{z}_1))^2 + \\
&+ ((\tilde{x}_2 - \tilde{x}_1) \cdot (y_0 - \tilde{y}_1) - (\tilde{y}_2 - \tilde{y}_1) \cdot (x_0 - \tilde{x}_1))^2, \\
4 \cdot F_{\Delta M_0P_1P_3}^2 &= ((\tilde{z}_3 - \tilde{z}_1) \cdot (y_0 - \tilde{y}_1) - (\tilde{y}_3 - \tilde{y}_1) \cdot (z_0 - \tilde{z}_1))^2 + \\
&+ ((\tilde{x}_3 - \tilde{x}_1) \cdot (z_0 - \tilde{z}_1) - (\tilde{z}_3 - \tilde{z}_1) \cdot (x_0 - \tilde{x}_1))^2 + \\
&+ ((\tilde{y}_3 - \tilde{y}_1) \cdot (x_0 - \tilde{x}_1) - (\tilde{x}_3 - \tilde{x}_1) \cdot (y_0 - \tilde{y}_1))^2, \\
4 \cdot F_{\Delta M_0P_2P_3}^2 &= ((\tilde{y}_2 - y_0) \cdot (\tilde{z}_3 - z_0) - (\tilde{y}_3 - y_0) \cdot (\tilde{z}_2 - z_0))^2 + \\
&+ ((\tilde{z}_2 - z_0) \cdot (\tilde{x}_3 - x_0) - (\tilde{x}_2 - x_0) \cdot (\tilde{z}_3 - z_0))^2 + \\
&+ ((\tilde{x}_2 - x_0) \cdot (\tilde{y}_3 - y_0) - (\tilde{y}_2 - y_0) \cdot (\tilde{x}_3 - x_0))^2.
\end{aligned} \tag{2.12}$$

Таким образом, выявлены необходимые расчетные формулы для решения вопроса о том, затеняется или нет, тот или иной тепловоспринимающий элемент другими частями его наружной поверхности от излучения, испускаемого этой поверхностью. Но прежде чем решать вопрос о затеняемости, целесообразно сначала выяснить, а может ли в силу своего расположения j -я грань участвовать в облучении i -го элемента. Для этого определим косинус угла ξ_{ij} между нормалью элемента di (\vec{n}_i) и вектором \vec{r}_{i-j} , соединяющим i -ый элемент с серединой j -ой грани. Если косинус угла окажется отрицательной величиной (в этом случае угол ξ_{ij}

превышает $\pi/2$), то грань не может участвовать в облучении i -го элемента и, следовательно, вопроса о затеняемости в этом случае не возникает, поскольку $\varphi_{di-j} = 0$. Косинус отмеченного угла можно определить, разделив скалярное произведение векторов \vec{n}_i и $\vec{\rho}_{i-j}$ на модуль вектора $\vec{\rho}_{i-j}$, т.е.

$$\cos \xi_{ij} = \frac{\vec{n}_i \cdot \vec{\rho}_{i-j}}{|\vec{\rho}_{i-j}|}.$$

2.2.2. Расчет угловых коэффициентов для имитаторов с линейчатыми излучателями.

Предположим, что ширина линейчатого излучателя является очень малой величиной по сравнению с расстоянием между соседними излучателями, то есть dF_i является элементарной площадкой.

Тогда исходное значение для φ_{dij} можно получить, рассматривая следующее очевидное соотношение для плотности потока излучения, падающего на i -ый элемент от j -го излучателя:

$$q_{ij} = \frac{1}{dF_i} \int_{F_j} J_j \cos \omega_{aji} d\Omega_{iaj} dF_j,$$

$$\text{где } J_j = J_j(0) \cdot \Phi(\theta_{aji}, \xi_{aji}), \quad d\Omega_{iaj} = \frac{dF_i \cos \omega_{idj}}{(|\vec{\rho}_{aji}|)^2}$$

Следовательно,

$$q_{ij} = J_j(0) \pi \int_{F_j} \Phi(\theta_{aji}, \xi_{aji}) \frac{\cos \omega_{aji} \cos \omega_{idj}}{\pi (|\vec{\rho}_{aji}|)^2} dF_j, \quad (2.11)$$

При этом

$$\cos \omega_{idj} = \frac{\vec{n}_i \vec{\rho}_{idj} + |\vec{n}_i \vec{\rho}_{idj}|}{2 |\vec{\rho}_{idj}|} \quad (2.12)$$

$$\cos \omega_{aji} = \frac{\vec{n}_j \vec{\rho}_{aji} + |\vec{n}_j \vec{\rho}_{aji}|}{2 |\vec{\rho}_{aji}|}$$

$$\vec{\rho}_{idj} = -\vec{\rho}_{aji} \quad (2.13)$$

Интеграл в выражении (2.11) имеет смысл локального углового коэффициента i -го тепловоспринимающего элемента и j -го излучателя, поскольку этот интеграл зависит только от геометрических параметров системы, тепловоспринимающий элемент – излучатель. Этот интеграл и обозначен через φ_{dij} .

Заметим, что в случае диффузного излучателя, когда Φ не зависит от углов θ_{dji} и ξ_{dji} ($\Phi = 1$), φ_{dij} становится равным диффузному локальному коэффициенту [18,19].

В связи с принятым предположением об элементарности ширины излучателя интегрирование по поверхности F_j можно заменить интегрированием по длине излучателя, т.е. интегрированием по z для излучателей, расположенных на цилиндрической поверхности, и по l – для излучателей, расположенных на торцевой плоскости.

Рассмотрим последовательно два отмеченных случая размещения излучателей.

1. Излучатели расположены вдоль образующих прямых цилиндрической поверхности.

Используя приведенные на рис. 2.5 расчетные схемы, выразим интеграл в соотношении (2.11) через параметры, характеризующие координаты и ориентацию тепловоспринимающих элементов и излучателей.

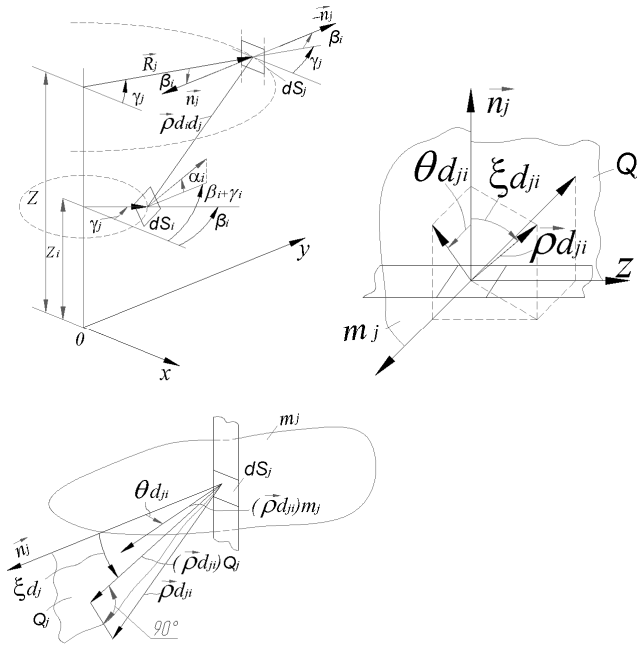


Рис.2.5 Схема для расчета локального углового коэффициента тепловоспринимающего элемента и линейного излучателя, расположенного вдоль образующих прямых цилиндрической поверхности имитатора.

Из рисунка следует, что

$$\begin{aligned}\vec{n}_i &= \{\cos \alpha_i \cos(\gamma_i + \beta_i); \cos \alpha_i \sin(\gamma_i + \beta_i); \sin \alpha_i\} \\ \vec{n}_j &= \{-\cos(\gamma_j + \beta_j); -\sin(\gamma_j + \beta_j); 0\} \\ \vec{\rho}_{idj} &= \{R_j \cos \gamma_j - r_i \cos \gamma_i; R_j \sin \gamma_j - r_i \sin \gamma_i; z - z_i\}\end{aligned}$$

Тогда скалярные произведения и модули векторов, входящие в выражения (2.12) и (2.13) после некоторых простых преобразований принимают вид:

$$\vec{n}_i \vec{\rho}_{idj} = \cos \alpha_i [R_j \cos(\gamma_i + \beta_i - \gamma_j) - r_i \cos \beta_i] + \sin \alpha_i (z - z_i) \quad (2.14)$$

$$\vec{n}_j \vec{\rho}_{dji} = R_j \cos \beta_j - r_i \cos(\gamma_j + \beta_j - \gamma_i) \quad (2.15)$$

$$|\vec{\rho}_{idj}| = |\vec{\rho}_{dji}| = \sqrt{(z - z_i)^2 + R_j^2 + r_i^2 - 2R_j \cdot r_i \cos(\gamma_j - \gamma_i)} \quad (2.16)$$

Выражение $\frac{\cos \omega_{dji} \cos \omega_{idj}}{\pi(|\vec{\rho}_{dji}|)^2}$ имеет смысл дифференциального диффузного углового коэффициента.

$$d\varphi^{\circ}_{didj} = \frac{(\vec{n}_i \vec{\rho}_{idj} + |\vec{n}_i \vec{\rho}_{idj}|)(\vec{n}_j \vec{\rho}_{dji} + |\vec{n}_j \vec{\rho}_{dji}|)}{4\pi(|\vec{\rho}_{idj}|)^2} \quad (2.17)$$

Уравнение (2.17) в совокупности с соотношениями (2.14)-(2.17) определяет зависимость $d\varphi^{\circ}_{didj}$ от геометрических параметров рассматриваемой системы.

Что касается углов θ_{dji} и ξ_{dji} , то их также можно выразить через геометрические параметры систем

$$\begin{aligned} \xi_{dji} &= \arccos \left| \frac{(\vec{\rho}_{dji})_{\text{пл}} \vec{n}_j}{(\vec{\rho}_{dji})_{\text{пл}} \vec{n}_j \vec{oZ}} \right|, \\ (\vec{\rho}_{dji})_{\text{пл}} \vec{n}_j &= \vec{\rho}_{dji} \vec{n}_j = R_j \cos \beta_j - r_i \cos(\gamma_j + \beta_j - \gamma_i), \\ |(\vec{\rho}_{dji})_{\text{пл}} \vec{n}_j \vec{oZ}| &= \sqrt{|(\vec{\rho}_{dji})_{\text{пл}} x|^2 + |(\vec{\rho}_{dji})_{\text{пл}} y|^2} = \sqrt{R_j^2 + r_i^2 - 2R_j \cdot r_i \cos(\gamma_j - \gamma_i)}, \\ |(\vec{\rho}_{dji})_{\text{пл}} \vec{n}_j \vec{oZ}| &= \sqrt{|(\vec{\rho}_{dji})_{\text{пл}} \vec{n}_j|^2 + |(\vec{\rho}_{dji})_{\text{пл}} z|^2} = \\ &= \sqrt{[R_j \cos \beta_j - r_i \cos(\gamma_j + \beta_j - \gamma_i)]^2 + (z - z_i)^2}. \end{aligned}$$

Следовательно,

$$\theta_{dji} = \arccos \left| \frac{R_j \cos \beta_j - r_i \cos(\gamma_j + \beta_j - \gamma_i)}{\sqrt{R_j^2 + r_i^2 - 2R_j \cdot r_i \cos(\gamma_j - \gamma_i)}} \right|, \quad (2.18)$$

$$\xi_{dji} = \arccos \left| \frac{R_j \cos \beta_j - r_i \cos(\gamma_j + \beta_j - \gamma_i)}{\sqrt{(z - z_i)^2 + [R_j \cos \beta_j - r_i \cos(\gamma_j + \beta_j - \gamma_i)]^2}} \right|. \quad (2.19)$$

Таким образом, величина φ_{dij} определяется следующим выражением:

$$\varphi_{dij} = P \int_{\bar{z}_j}^{\bar{\bar{z}}_j} \frac{B + \sin \alpha_i (z - z_i) + |B + \sin \alpha_i (z - z_i)|}{2\pi[(z - z_i)^2 + D^2]^2} C \cdot \Phi(\theta_{ji}, \xi_{dji}) dz \quad (2.20)$$

где $\theta_{ji} = \theta_{dji}$,

$$B = \cos \alpha_i [R_j \cos(\gamma_i + \beta_i - \gamma_j) - r_i \cos \beta_i],$$

$$C = R_j \cos \beta_j - r_i \cos(\gamma_j + \beta_j - \gamma_i),$$

$$D = \sqrt{R_j^2 + r_i^2 - 2R_j \cdot r_i \cos(\gamma_j - \gamma_i)}.$$

Углы θ_{ji} и ξ_{dji} в выражении (2.20) определяются соотношениями (2.16) и (2.17).

Учитывая то, что облучатели имитаторов рассматриваемого типа состоят, как правило, из диффузно излучающей ленты и отражателя, можно ввести предположение о независимости индикатрисы излучения Φ от угла ξ_{dji} . При наличии этого предположения подынтегральная функция как функция переменной z значительно упрощается. $\Phi(\theta_{j,i})$ в этом случае выносится за знак интеграла, а квадратура в выражении для φ_{dij} может быть вычислена аналитически. Так при неотрицательных значениях выражения $B + \sin \alpha_i (z - z_i)$ после несложных преобразований расчетное выражение для φ_{dij} принимает вид:

$$\begin{aligned} \varphi_{dij} = \frac{P \cdot \Phi(\theta_{ji}) \cdot C}{2\pi} & \left[\frac{1}{(\bar{\bar{z}}_j - z_i)^2 + D^2} \left(\frac{B(\bar{\bar{z}}_j - z_i)}{D^2} - \sin \alpha_i \right) \right. \\ & + \frac{1}{(\bar{z}_j - z_i)^2 + D^2} \left(\sin \alpha_i - \frac{B(\bar{z}_j - z_i)}{D^2} \right) \\ & \left. + \frac{B}{D^3} \left(\operatorname{arctg} \frac{\bar{\bar{z}}_j - z_i}{D} - \operatorname{arctg} \frac{\bar{z}_j - z_i}{D} \right) \right] \quad (2.21) \end{aligned}$$

Если же во всех точках интервала интегрирования $[\bar{z}_j, \bar{\bar{z}}_j]$ выполняется неравенство $B + \sin \alpha (z - z_i) \leq 0$, что имеет место при $\omega_{idj} \geq \frac{\pi}{2}$, то $\varphi_{dij} = 0$.

Выражение $B + \sin \alpha_i (z - z_i)$ линейно зависит от z , следовательно, если на концах интервала $[\bar{z}_j, \bar{\bar{z}}_j]$ оно имеет одинаковый знак, то и во всех других точках этого интервала знак будет тот же.

Задача определения φ_{dij} несколько усложняется в случае, когда часть элементарных излучателей рассматриваемого i -го модуля участвует в облучении i -го тепловоспринимающего элемента, а другая часть – нет. Или, говоря формально, на одной части интервала $[\bar{z}_j, \bar{\bar{z}}_j]$ выражение $B + \sin \alpha_i (z - z_i)$ положительно, на другой – отрицательно. Для таких облучателей рекомендуется сначала определить то значение z (значение \tilde{z}_j), при котором $B + \sin \alpha_i (z - z_i) = 0$, а затем вычислить φ_{dij} , используя соотношение (2.19), но проводя в нем следующую замену: если $B + \sin \alpha_i (\bar{\bar{z}}_j - z_i) \geq 0$, то вместо $\bar{z}_j - z_i$ подставляется $\tilde{z}_j - z_i$, где $\tilde{z}_j = z_i - B/\sin \alpha_i$. Если $B + \sin \alpha_i (\bar{\bar{z}}_j - z_i) < 0$, то $\tilde{z}_j - z_i$ подставляется вместо $\bar{\bar{z}}_j - z_i$.

2. Излучатели установлены на торцевой плоскости

Для торцевых излучателей

$$\varphi_{dij} = P \int_{-l_0/2}^{l_0/2} \Phi(\theta_{ji}) \frac{\cos \omega_{dji} \cos \omega_{idj}}{\pi(|\vec{\rho}_{dji}|)^2} dl \quad (2.22)$$

Входящие в подынтегральное выражение $\cos \omega_{dji}$ и $\cos \omega_{idj}$ определяются такими же, как и для случая боковой поверхности имитатора, соотношениями (2.12) и (2.13). Координаты векторов, которые входят в отмеченные соотношения, можно определить, используя приведенную на рис.2.6 расчетную схему.

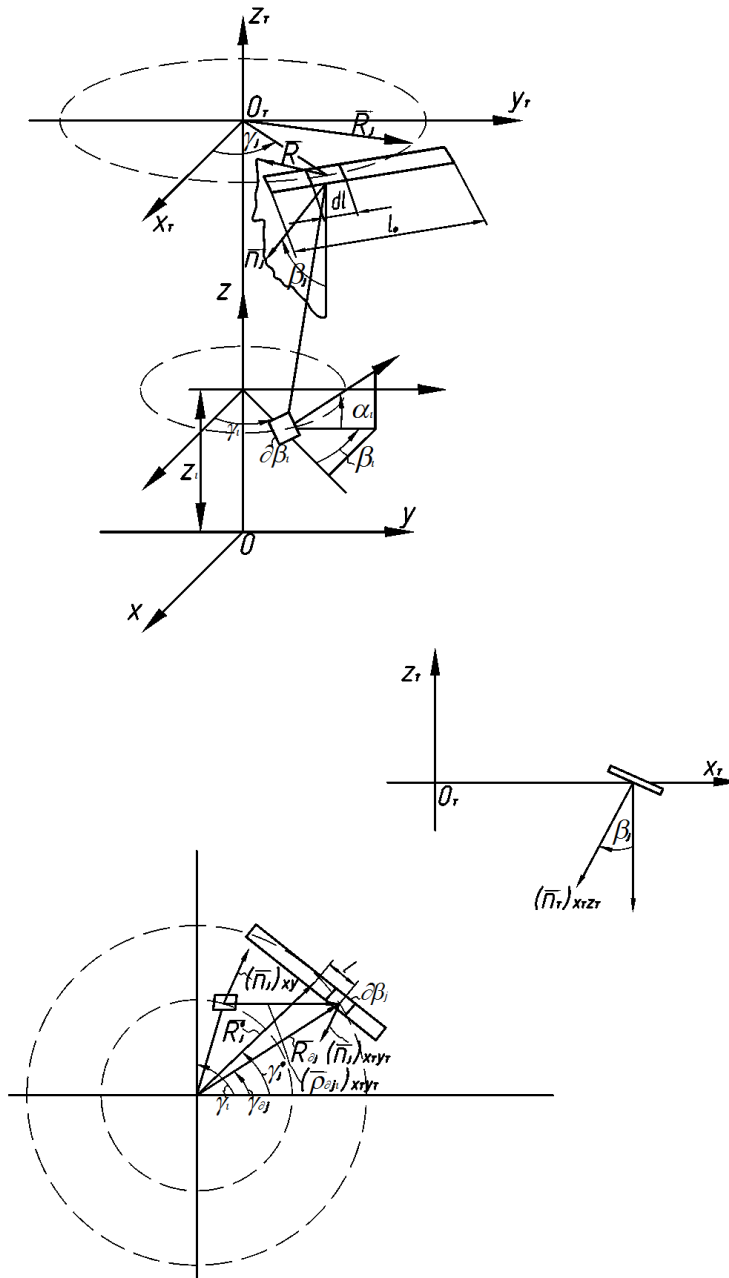


Рис.2.6. Схема для расчета локальных угловых коэффициентов тепловоспринимающих элементов и торцевых излучателей имитатора.

В соответствии с этой схемой и принятыми обозначениями

$$\frac{d\Omega}{\Omega} = \frac{dR}{R} + \frac{d\beta}{\beta} + \frac{d\gamma}{\gamma}$$

(2.23)

$$\vec{\rho}_{idj} = \{R_{dj} \cos \gamma_{dj} - r_i \cos \gamma_i; R_{dj} \sin \gamma_{dj} - r_i \sin \gamma_i; z^{\circ T} - z_i\}, \quad (2.24)$$

$$|\vec{\rho}_{idj}| = |\vec{\rho}_{dji}| = \sqrt{R_{dj}^2 + r_i^2 - 2R_{dj}r_i \cos(\gamma_i - \gamma_{dj}) + (z_i - z^{\circ T})^2}, \quad (2.25)$$

$$\begin{aligned} \vec{\rho}_{idj}\vec{n}_i &= (\vec{\rho}_{idj})\vec{n}_i = \\ &= \cos \alpha_i [R_{dj} \cos(\gamma_i + \beta_i - \gamma_{dj}) - r_i \cos \beta_i] + \sin \alpha_i (z^{\circ T} - z_i), \end{aligned} \quad (2.26)$$

$$\begin{aligned} \vec{\rho}_{dji}\vec{n}_j &= (\vec{\rho}_{dji})\vec{n}_j = \\ &= \sin \beta_j [R_{dj} \cos(\gamma^{\circ j} - \gamma_{dj}) - r_i \cos(\gamma^{\circ j} - \gamma_j)] + \cos \beta_j (z^{\circ T} - z_i), \end{aligned} \quad (2.27)$$

$$\theta_{dji} = \arccos \left| \frac{(\vec{\rho}_{dji})\vec{n}_j}{(\vec{\rho}_{dji})_{\text{пл}} \vec{n}_j \vec{oZ}} \right| \quad (2.28)$$

$$|(\vec{\rho}_{dji})_{\text{пл}} \vec{n}_j \vec{oZ}| = \sqrt{|(\vec{\rho}_{dji})_{\vec{K}}|^2 + (z^{\circ T} - z_i)^2}, \quad (2.29)$$

$$(\vec{\rho}_{dji})_{\vec{K}} = \vec{\rho}_{dji} \cdot \vec{K}, \quad (2.30)$$

где $\vec{K} = \{-\cos \gamma^{\circ j}; -\sin \gamma^{\circ j}; 0\}$

Следовательно,

$$(\vec{\rho}_{dji})_{\vec{K}} = R_{dj} \cos(\gamma^{\circ j} - \gamma_{dj}) - r_i \cos(\gamma^{\circ j} - \gamma_j). \quad (2.31)$$

Таким образом, подынтегральная функция в выражении (2.22) определяется системой соотношений (2.11), (2.12), (2.23)-(2.31).

2.2.3. Расчет угловых коэффициентов для имитаторов с сетчатыми нагревателями.

В данном разделе излагаются два различных метода определения угловых коэффициентов между элементами поверхности испытуемого объекта и сетчатыми нагревателями.

1) Метод, основанный на аппроксимации элементов поверхности излучающей нити поверхностью многогранника.

Сетчатый нагреватель, как известно, представляет собой совокупность последовательно электрически запитываемых параллельных нитей из токопроводящего материала с высокой степенью черноты. Не существует формул, позволяющих определить локальный угловой коэффициент произвольно ориентированного тепловоспринимающего элемента с цилиндрической поверхностью ограниченной длины, то есть с элементом нити или со всей нитью. Поэтому возникает необходимость в численном решении задачи. Для этого каждая нить разбивается по длине на мелкие цилиндрические участки. Поверхность каждого участка аппроксимируется многогранной поверхностью с треугольными гранями, характерные размеры которых малы по сравнению с расстоянием до тепловоспринимающей поверхности. На поверхности нити в каждом сечении задаются равномерно расположенные по окружности точки, которые будут являться вершинами треугольных граней аппроксимирующей поверхности. Но при попытке осуществления расчета дифференциальных угловых коэффициентов элементов тепловоспринимающей поверхности с чрезвычайно мелкими (по одному измерению) гранями участков разбиения нитей нагревателя возникают математические трудности. Это связано с тем, что длина участка разбиения (даже при большом их количестве) намного превышает размеры основания граней вследствие малого диаметра нити, что приводит к ошибкам определения координат центральных точек таких чрезвычайно узких треугольных граней и ошибкам в определении их ориентации. Учитывая это обстоятельство и исходя из понятия углового коэффициента как числа, характеризующего долю энергии излучения одного элемента, попадающего на другой элемент, рекомендуется сначала вычислять угловые коэффициенты между элементами излучателя и элементами тепловоспринимающей поверхности. При таком подходе диаметр нити излучателя можно задавать намного большим по сравнению с истинным диаметром, выполняя при этом лишь условие малости нового диаметра по отношению к расстоянию до

тепловоспринимающей поверхности. Это дает возможность избежать отмеченных математических трудностей, порождающих ошибки вычисления угловых коэффициентов. Искомый дифференциальный угловой коэффициент элемента тепловоспринимающей поверхности с элементами излучателя затем определяется с использованием свойства взаимности угловых коэффициентов и с учетом соотношения размеров площадей фиктивной и реальной нитей. Это соотношение равно отношению диаметров сопоставляемых нитей.

Рассмотрим алгоритм, реализующий данный подход к определению плотности тепловых потоков, падающих на тепловоспринимающие элементы испытываемого объекта от излучающих нитей нагревателя. Этот алгоритм уже рассматривался в статье [35], но в данной работе он значительно подкорректирован.

Введем в рассмотрение прямоугольную пространственную систему координат, связанную с 1-ой излучающей нитью сетчатого нагревателя, направив ось OX вдоль центральной оси нити и разместив ось OZ в плоскости нагревателя. Ось OY образует с осями OX и OZ правую систему координат (см. рис. 2.7, заимствованный из [35]). Начало координат совместим с центральной точкой торца 1-ой нити. Пусть истинный диаметр токопроводящей нити излучателя равен d . Увеличим этот диаметр до величины d^* такой, чтобы, с одной стороны, меньший угол треугольной грани был бы достаточен для безошибочного определения координат центральной ее точки как точки пересечения медиан, а с другой стороны, был бы мал по сравнению с расстоянием до тепловоспринимающего элемента.

Условимся в дальнейшем употреблять надстрочный индекс $*$ для обозначения величин площади элемента излучателя с фиктивным диаметром d^* (dF_j^*) и для обозначения плотности потока его излучения (q_j^*).

Рассмотрим в выбранной системе координат теплообмен тепловоспринимающего элемента dF_i с элементом излучателя dF_j^* ,

принадлежащего некоторой i -ой нити. Пусть в выбранной системе координат центральные точки тепловоспринимающего элемента и элемента излучателя имеют соответственно координаты (m_i, n_i, p_i) и (m_j, n_j, p_j) .

Величина теплового потока, приходящего от элемента dF_j^* к тепловоспринимающему элементу dF_i характеризуется следующим известным [9] соотношением:

$$d^2 Q_{dj \rightarrow di} = \frac{q_j^*}{\pi} dF_j^* \cdot \cos \varphi_j \frac{\cos \varphi_i \cdot dF_i}{\rho_{dj-di}^2}, \quad (2.32)$$

$$\text{где } q_{dj}^* = q_{dj} \frac{d}{d^*}.$$

Тогда плотность теплового потока q_{di} , падающего на тепловоспринимающий элемент dF_i , определяется выражением

$$q_{di} = q_{dj} \frac{d}{d^*} \cdot d\varphi_{di-dj} \quad (2.33),$$

где $d\varphi_{di-dj} = \frac{\cos \varphi_i \cdot \cos \varphi_j}{\pi \cdot \rho_{dj-di}^2} dF_{dj}^*$ – дифференциальный угловой коэффициент di –

го элемента с фиктивным dj -м элементом с площадью dF_j^* , а

$$q_{dj} = \frac{W \cdot 4}{\pi \cdot d \cdot l \cdot m}. \quad (2.34)$$

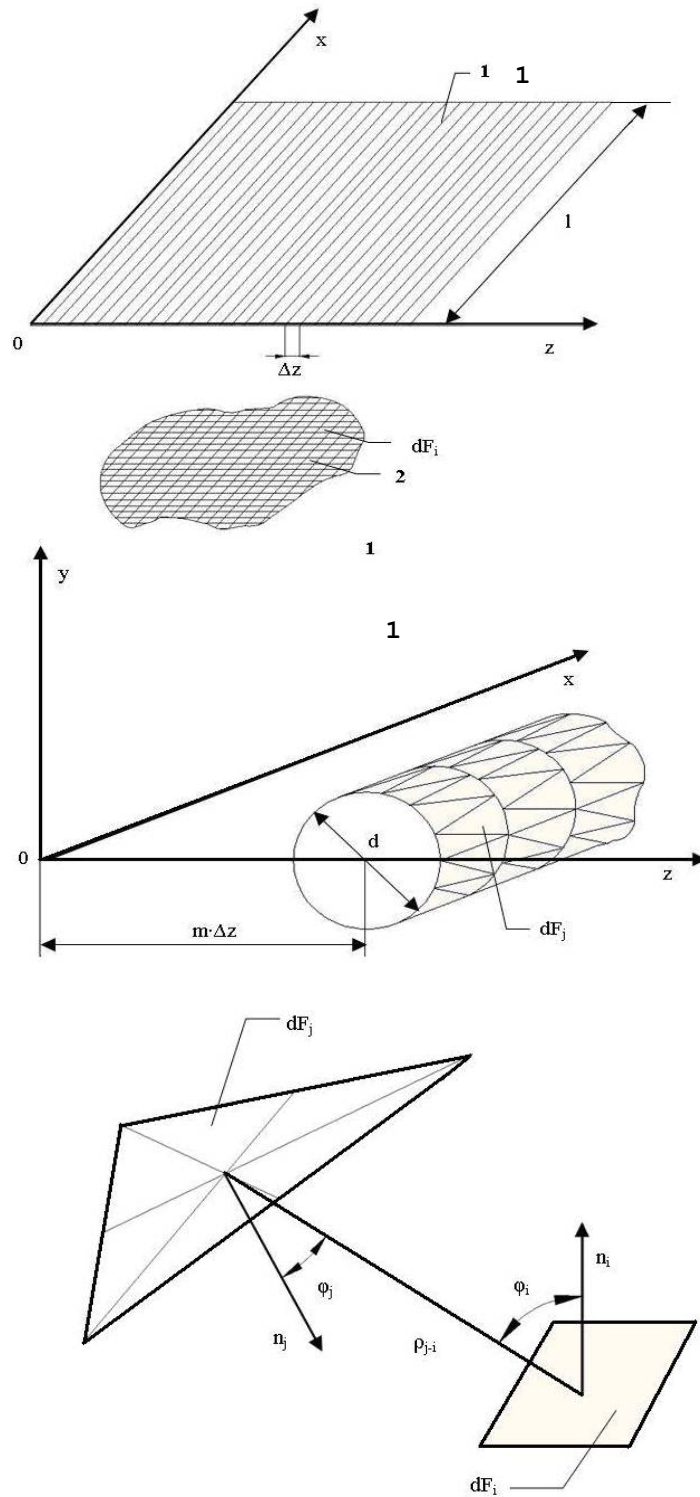
В выражении для q_{di} :

W – мощность, подводимая к сетчатому нагревателю,

l – длина одной нити,

m – число нитей.

Суммируя дифференциальные угловые коэффициенты между элементом dF_i и всеми гранями рассматриваемой излучающей нити, получим значение локального углового коэффициента φ_{di-k} между элементом dF_i и k -ой излучающей нитью.



2.7. Схема для расчета угловых коэффициентов.

1 – одна из излучающих нитей сетчатого нагревателя, 2 – тепловоспринимающая поверхность, dF_j – элемент излучающей нити, dF_i – элемент тепловоспринимающей поверхности, Δz – шаг между излучающими нитями.

Обычно у сетчатых нагревателей диаметр d излучающей нити мал по сравнению с расстоянием между соседними нитями Δz ($\Delta z/d > 10$), в то время как расстояние до облучаемой поверхности превышает величину Δz , по крайней мере, в несколько раз. Поэтому излучение, испускаемое какой-то нитью нагревателя в сторону тепловоспринимающей поверхности, не экранируется соседними нитями. Кроме того, доля энергии излучения любой нити, попадающая на соседние нити пренебрежимо мала вследствие малости соотношения $d/\Delta z$. Эти два обстоятельства дают основание для введения упрощающего предположения о том, что каждая нить участвует в облучении испытуемого объекта автономно. При наличии этого предположения локальный угловой коэффициент тепловоспринимающего элемента dF_i со всеми излучающими нитями сетчатого нагревателя $\varphi_{di-\text{нагр}}$ определяется путем суммирования локальных угловых коэффициентов этого элемента со всеми нитями нагревателя, то есть

$$\varphi_{di-\text{нагр}} = \sum_{k=1}^m \varphi_{di-k} \quad (2.35)$$

В описанном алгоритме определения плотности теплового потока, падающего на тепловоспринимающий элемент dF_i , считалось, что координаты центра элементарной площадки dF_{di} и ориентация ее нормали заданы в стендовой системе координат, т.е. системе координат, связанной с сетчатым нагревателем. Однако геометрические характеристики тепловоспринимающей поверхности и ее отдельных элементов удобно и целесообразно задавать в системе координат, связанной с этой поверхностью. Поэтому возникает необходимость перехода от связанной с облучаемой поверхностью системы координат к стендовой системе.

Переход к стендовой системе координат можно осуществить, если воспользоваться известными в аналитической геометрии формулами [10], связывающими прямоугольные координаты двух произвольно расположенных относительно друг друга пространственных систем

координат. Для этого необходимо задать взаимное расположение и взаимную ориентацию осей связанной и стендовой систем координат, а именно, координаты точки O_0 в стендовой системе координат и косинусы углов между осями $x_0x, y_0y, z_0z, x_0y, x_0z, y_0x, y_0z, z_0x, z_0y$.

Поверхность, подвергающуюся воздействию исходящего от сетчатого нагревателя излучения, можно так же, как и поверхность излучающих нитей, аппроксимировать поверхностью многогранника с треугольными гранями. Вершинами этих граней являются точки поверхности, координаты которых должны быть заданы в какой-то связанной с этой поверхностью системе координат.

2) Подход, основанный на замене цилиндрического элемента излучателя плоским.

Алгоритм расчета угловых коэффициентов можно существенно упростить, если обратить внимание на следующее очень важное обстоятельство. В направлении любого элемента тепловоспринимающей поверхности достаточно узкий 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 Ω , 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 (см. рис.2.8).

Данное предположение может быть принято в связи с тем, что диаметр излучающей нити d во много раз меньше расстояния ρ до тепловоспринимающих элементов ($d/\rho \ll 1$). Действительно, если, например, диаметр нити равен 1 мм, то расстояние до облучаемых элементов испытываемого объекта, как правило, не меньше 100 мм.

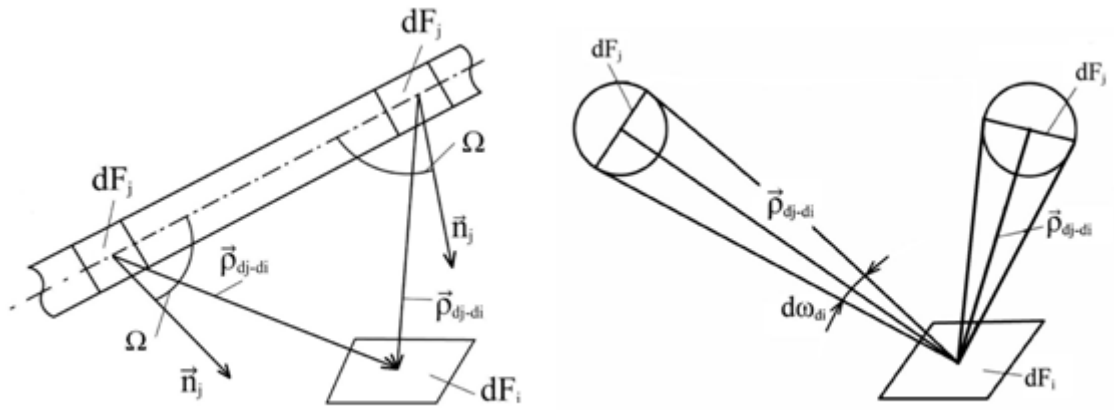


Рис. 2.8. Иллюстрация принципа замены участка излучающей нити плоским элементом.

Вследствие этого лучи, исходящие из точек тепловоспринимающих элементов, с высокой точностью можно считать параллельными. Так при $d/\rho = 0,01$ угол расходимости лучей не превышает $0,29^\circ$. В итоге можно заменять цилиндрические элементы излучающей нити плоскими элементами с ориентацией, о которой говорилось выше, что дает возможность не прибегать к аппроксимации цилиндрической поверхности поверхностью многогранника с треугольными гранями для вычисления угловых коэффициентов.

Для составления нового алгоритма решения задачи введем в рассмотрение прямоугольную систему координат, связанную с первой излучающей нитью нагревателя, направив ось Ox вдоль центральной оси нити и разместив ось Oz в плоскости нагревателя. Тогда ось Oy будет перпендикулярна плоскости нагревателя. Эта ось образует с осями Ox и Oz правую систему координат (см. рис. 2.9).

Начало координат совместим с центральной точкой торца первой нити и, следовательно, с центральной точкой торца плоской нити, элементы которой при переходе от одной точки тепловоспринимающей поверхности к другой изменяют свою ориентацию так, что нормаль элемента находится в плоскости Ω . Разобьем каждую нить на n частей Δx , настолько малых, что

длина каждого участка разбиения мала по сравнению с расстоянием до тепловоспринимающей поверхности.

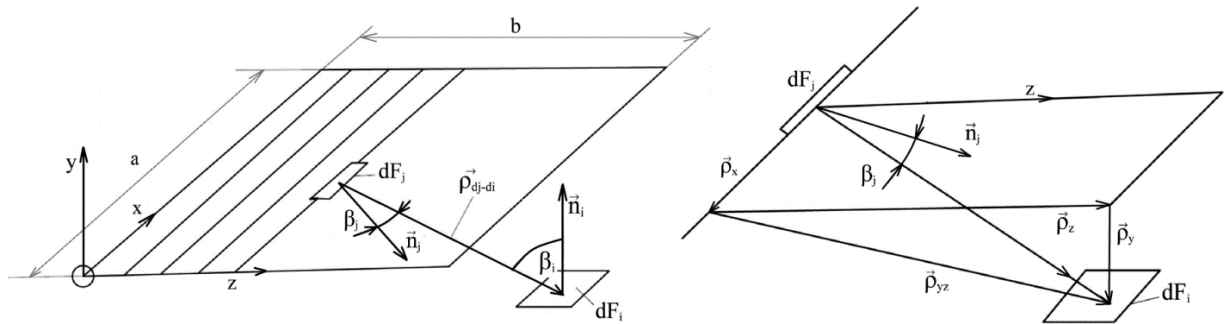


Рис.2.9. Схема для определения углового коэффициента между тепловоспринимающим элементом dF_i и элементом dF_j нагревателя.

Рассмотрим в выбранной системе координат теплообмен тепловоспринимающего элемента dF_i с элементом плоского излучателя dF_j , принадлежащего некоторой k -ой нити. Пусть в выбранной системе координат центральные точки тепловоспринимающего элемента и элемента излучателя имеют соответственно координаты (x_i, y_i, z_i) и (x_j, y_j, z_j) , а направляющие косинусы нормали к плоскости тепловоспринимающего элемента имеют значения (m_i, n_i, p_i) .

Обозначим через β_i и β_j углы, которые образуют нормали соответственно к элемента dF_i и dF_j с прямой, соединяющей центры рассматриваемых элементарных площадок. Тогда величина теплового потока $d^2Q_{dj \rightarrow di}$, приходящего от элемента dF_j к тепловоспринимающему элементу dF_i характеризуется следующим известным выражением [19]:

$$d^2Q_{dj \rightarrow di} = \frac{q_w}{\pi} dF_j \cdot \cos \beta_j \cdot \frac{\cos \beta_i \cdot dF_i}{\rho_{dj-di}^2}.$$

В этом выражении q_w плотность потока излучения, испускаемого нитью нагревателя. При этом $q_w = \frac{W}{\pi \cdot d \cdot l \cdot m}$, где W – подводимая к сетчатому нагревателю мощность, l – длина одной нити, m – число нитей.

Плотность теплового потока q_{di} , падающего на тепловоспринимающий элемент dF_i , определяется соотношением $q_{di} = q_w \cdot d\varphi_{di-dj}$, где

$$d\varphi_{di-dj} = \frac{\cos \beta_i \cdot \cos \beta_j}{\pi \cdot \rho_{dj-di}^2} dF_j \quad - \text{угловой коэффициент } di\text{-го элемента}$$

теповоспринимающей поверхности с dj -ым элементом излучателя. В выражении для $d\varphi_{di-dj} dF_j = d \cdot \Delta x$, $\Delta x = l/n$.

Чтобы записать выражения для $\cos \beta_i$ и $\cos \beta_j$ обозначим через (ρ_x, ρ_y, ρ_z) координаты вектора $\vec{\rho}_{dj-di}$, а через \vec{n}_j – единичный вектор, перпендикулярный плоскости элемента dF_j .

При этом $\rho_x = x_i - x_j$, $\rho_y = y_i - y_j$, $\rho_z = z_i - z_j$

$$\vec{n}_j = \left(0, \frac{\rho_y}{\sqrt{\rho_y^2 + \rho_z^2}}, \frac{\rho_z}{\sqrt{\rho_y^2 + \rho_z^2}} \right). \text{ Тогда } \rho_{dj-di}^2 = \rho_x^2 + \rho_y^2 + \rho_z^2,$$

$$\cos \varphi_i = \frac{|m_i \cdot \rho_x + n_i \cdot \rho_y + p_i \cdot \rho_z|}{|\vec{\rho}_{di-dj}|} \quad \cos \beta_j = \frac{|\vec{n}_j \cdot \vec{\rho}_{dj-di}|}{|\vec{\rho}_{dj-di}|}$$

Суммируя дифференциальные угловые коэффициенты между элементом dF_i и всеми элементами dF_j ($j = 1, \dots, n$) k -ой нити получим значение локального углового коэффициента φ_{di-k} между элементом dF_i и k -ой излучающей нитью.

Обычно у сетчатых нагревателей диаметр d излучающей нити мал по сравнению с расстоянием между соседними нитями Δz и ($\Delta z/d > 10$), в то время как расстояние до облучаемой поверхности превышает величину Δz , по крайней мере, в несколько раз. Поэтому излучение, испускаемое какой-то нитью нагревателя в сторону тепловоспринимающей поверхности, не экранируется соседними нитями. Кроме того, доля энергии излучения любой нити, попадающего на соседние нити, пренебрежимо мала вследствие малости соотношения $d/\Delta z$. Поэтому теплообмен излучением между соседними нитями практически не изменяет их тепловое состояние.

Отмеченные обстоятельства дают основание для введения упрощающего предположения о том, что каждая нить участвует в облучении испытуемого объекта автономно. При наличии этого предположения локальный угловой коэффициент тепловоспринимающего элемента dF_i со всеми излучающими нитями сетчатого нагревателя ($\varphi_{di-\text{нагр}}$) определяется путем суммирования локальных угловых коэффициентов этого элемента со всеми нитями нагревателя, то есть $\varphi_{di-\text{нагр}} = \sum_{k=1}^m \varphi_{di-k}$. Локальные угловые коэффициенты для различных нитей определялись по тому же алгоритму, что и для первой нити. При переходе от первой нити к последующим изменяется лишь координата z на величину шага Δz , равного расстоянию между соседними нитями.

Описанные в данном разделе два методических подхода к определению угловых коэффициентов были реализованы в виде программы расчета распределения плотности потока излучения, падающего от сетчатого нагревателя на элементы непрерывных поверхностей различной формы. Предполагалось, что к сетчатому нагревателю подводится электрическая мощность, обеспечивающая воспроизведение заданной средней плотности потока излучения, падающего на рассматриваемую поверхность. На рисунках 2.10, 2.11 приводятся результаты расчета локальных относительных погрешностей $\Delta \bar{q}$ воспроизведения заданных тепловых нагрузок на плоские тепловоспринимающие поверхности, имеющие форму квадрата. Расчеты выполнялись с использованием второго подхода к определению угловых коэффициентов. Рассматривался сетчатый нагреватель, образованный токопроводящими нитями длиной 0,5 м. Нити располагались параллельно относительно друг друга с шагом, равным 1 см. Количество нитей – 51, а толщина – 1 мм. Каждая нить поперечными секущими плоскостями разбивалась на 50 участков.

Плоскости тепловоспринимающих поверхностей располагались параллельно плоскости сетчатого нагревателя. Каждая из этих поверхностей разбивалась на 2500 элементов квадратной формы. Расстояние между плоскостями нагревателя и облучаемой поверхностью принималось равным 0,1 м. К нагревателю подводилась мощность, обеспечивающая среднеинтегральную по облучаемой поверхности плотность падающего потока $\tilde{q} = 1400 \text{ Вт/м}^2$. При этом $\Delta\bar{q} = \frac{q - \tilde{q}}{\tilde{q}}$, где q – локальная плотность потока излучения, падающего на каждый из 2500 элементов тепловоспринимающей поверхности. В силу симметрии расположения тепловоспринимающих элементов относительно осей O_0X_0 и O_0Z_0 (см. рис. 2.10), а также симметрии относительно центральных осей нагревателя, на графиках рисунков 2.11, 2.12 результаты расчета погрешностей приводятся лишь для элементов с координатами $z_0 \in [0; 0,5b]$ и $x_0 \in [0; 0,5a]$.

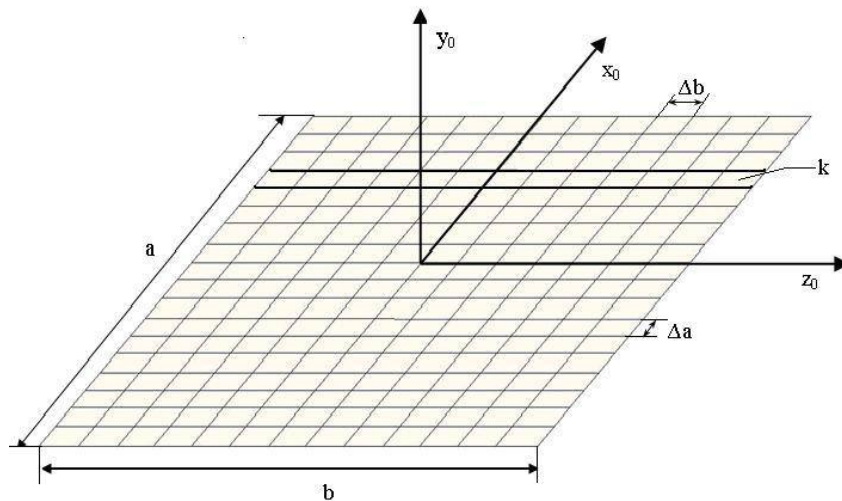


Рис.2.10. Схема разбиения тепловоспринимающей панели на элементарные площадки.

При этом на отмеченных рисунках кривые с номерами 2, 6, 10, 14, 18, 22 относятся к дискретным относительным значениям $\bar{x}_0 = x_0/a$, соответственно равным 0 ; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5.

Рисунки 2.11, 2.12 соответствуют тепловоспринимающим панелям с размерами, соответственно равными $0,25 \text{ м} \times 0,25 \text{ м}$ и $0,1 \text{ м} \times 0,1 \text{ м}$

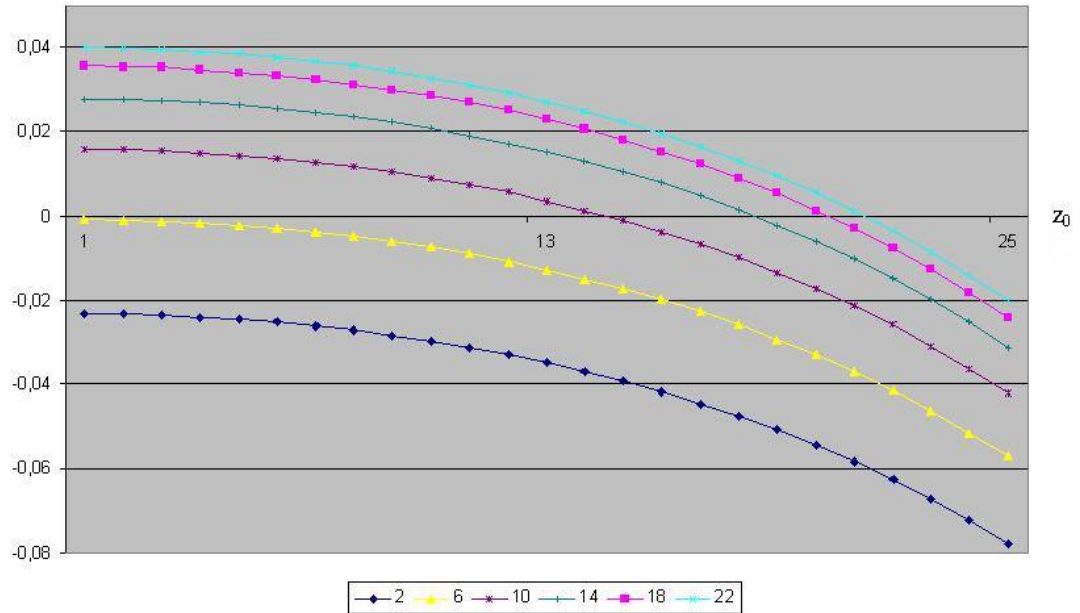


Рис. 2.11. Локальные относительные погрешности воспроизведения заданной тепловой нагрузки на панель размером $0,25 \text{ м} \times 0,25 \text{ м}$.

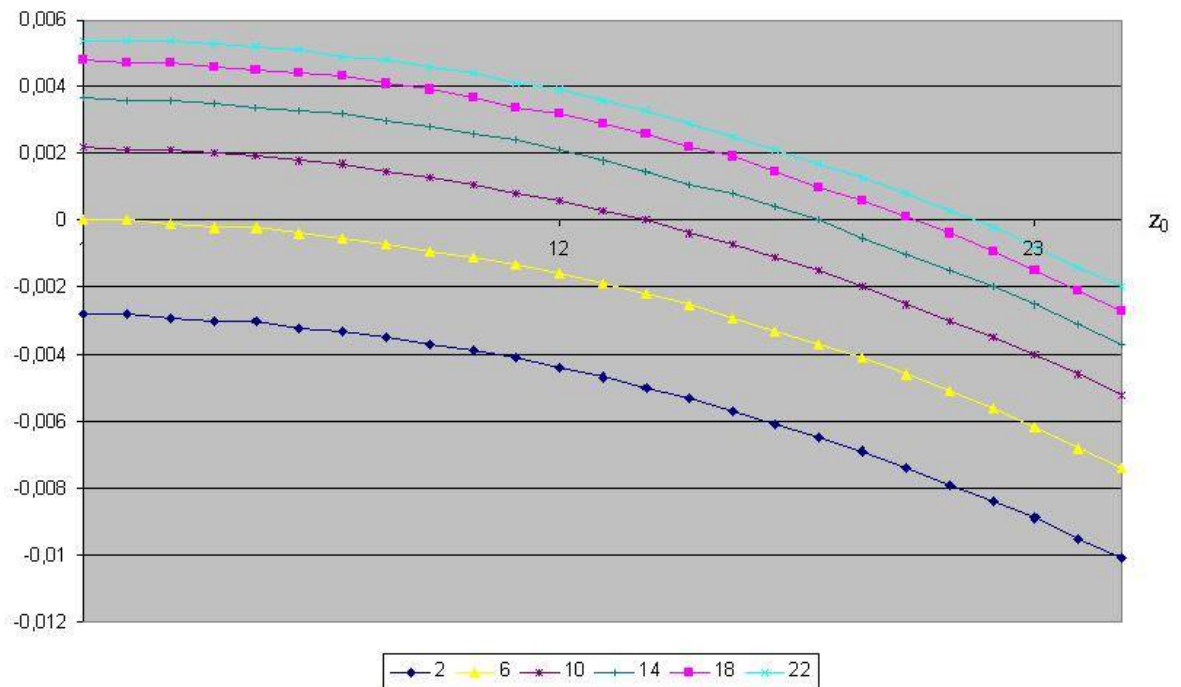


Рис.2.12. Локальные относительные погрешности воспроизведения заданной тепловой нагрузки на панель размером $0,1 \text{ м} \times 0,1 \text{ м}$.

Сопоставляя полученные результаты с результатами, представленными в статье [35] для аналогичных исходных данных, можно сделать вывод об их практическом совпадении.

Возникает вопрос о достоверности результатов, получаемых с помощью компьютерной программы, в которой реализован рассматриваемый подход и алгоритм решения задачи выбора режима работы сетчатого нагревателя. Для ответа на этот вопрос проводилась следующая проверка. Предполагалось, что диаметр d нити равен шагу Δz . То есть, сетчатый нагреватель превращался просто в сплошную излучающую панель, образованную плотно скомпонованными цилиндрами. Если тепловоспринимающую поверхность расположить достаточно далеко, допустим, на расстоянии, равном двум характерным размерам излучающей панели, то нетрудно обнаружить, что излучение нитей, испускаемое в направлении теплоприемника, не экранируется соседними нитями и, следовательно, несмотря на большой диаметр нити, для расчета нужного углового коэффициента правомерно использовать рекомендуемую в данной статье методику. Что и делалось, а полученный результат сопоставлялся с результатом расчета того же углового коэффициента с помощью известных [24,54] выражений для угловых коэффициентов между соосно расположенными квадратными пластинами. Проверка осуществлялась для излучателя и тепловоспринимающей поверхности одинаковых размеров квадратной формы. Расстояние между ними принималось равным двум длинам стороны квадрата. Относительная разность значений угловых коэффициентов, вычисленных разным способом, оказалась меньше двух процентов.

Таким образом, есть основания считать, что изложенный в [35] и разработанный в данной диссертационной работе подходы и алгоритмы

определения угловых коэффициентов обладают достаточно высокой точностью.

Выводы по главе 2.

1. Результаты исследования различных методов оптимизации энергетических режимов работы имитаторов модульного типа свидетельствуют о том, что градиентные методы и метод, основанный на использовании необходимого условия существования экстремума функции многих переменных дают мало отличающиеся результаты по точности моделирования, но положение точек минимума целевой функции существенно отличаются. Это свидетельствует об отсутствии единственности решения рассматриваемой задачи, то есть свидетельствует о наличии у целевой функции нескольких минимумов.

2. Требуемую величину электрической мощности, подводимой к сетчатому нагревателю, целесообразно определять из условия минимума целевой функции, характеризующей среднеквадратичную погрешность воспроизведения заданных тепловых нагрузок на элементы поверхности испытываемого объекта.

3. Проанализированы различные методы определения угловых коэффициентов между тепловоспринимающими элементами поверхности испытываемого объекта и излучающими элементами инфракрасных имитаторов различного типа. Для сетчатых нагревателей разработан новый метод расчета угловых коэффициентов, существенно упрощающий ввод данных о сетчатом нагревателе и многократно уменьшающий время решения задачи определения оптимального энергетического режима работы сетчатого нагревателя.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ МОДУЛЕЙ ИМИТАТОРА ОТ ПОДВОДИМОЙ К НИМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ.

3.2. Методический подход к экспериментальному определению зависимости интенсивности излучения модуля имитатора от подводимой к нему электрической мощности.

Изложенная в предыдущей главе методика определения оптимального режима работы инфракрасного имитатора позволяет выявить абсолютные и относительные значения интенсивностей излучения модулей имитатора, обеспечивающих минимальное значение целевой функции. Однако практическую ценность от решения задачи минимизации целевой функции представляют лишь относительные значения интенсивностей. По сути дела эти значения характеризуют относительные значения электрических мощностей, подводимых к модулям имитатора, так как между мощностью и интенсивностью, как показала практика, существует практически линейная связь. В доступных источниках такая связь известна лишь для инфракрасных имитаторов тепловакуумных установок НПО «Молния». Но в модулях имитаторов этих установок отсутствуют отражатели, которые чрезвычайно сильно усложняют эту связь. Для непосредственного использования результатов решения задачи оптимизации режима работы ИКИ знание такой связи необходимо.

Целесообразнее всего коэффициент этой связи выявлять экспериментально. Такую экспериментальную работу можно провести как попутную с какими-либо испытаниями, поскольку этот эксперимент будет непродолжительный – менее двух часов. Излучающий модуль, например, метровой длины размещается в тепловакуумной камере, оснащенной криогенными экранами. На некотором расстоянии от выходного сечения отражателя модуля (0,5 м; 0,8 м) устанавливается один или два датчика плотности теплового потока. После выхода экспериментальной установки на

рабочий режим по уровню вакуума и по температуре криогенных экранов к модулю подводится некоторая определенная мощность, например 1000 Вт. После этого начинается регистрация температур теплоприемников датчиков плотности тепловых потоков. Эксперимент продолжается до выхода температур теплоприемников на уровень, близкий к стационарному.

Зарегистрированные в эксперименте величины плотности тепловых потоков, падающих на теплоприемники датчиков, используются затем как входная информация в компьютерной программе определения оптимального значения интенсивности излучения модуля. Кроме этого, в программу вводится информация об относительном расположении модуля и датчиков в экспериментальной установке. На основе этих входных выполняется расчет значения интенсивности излучения модуля, при котором на поверхности теплоприемников (датчиков) реализуются замеренные в эксперименте значения плотности теплового потока. Соотнося расчетные значения интенсивности излучения модуля и значение подводимой в эксперименте электрической мощности, устанавливается связь между интенсивностью излучения и мощностью: $W = C \cdot J(0)$, где C - коэффициент связи.

В следующем разделе излагается аналитический подход к решению задачи определения искомой зависимости.

3.3. Аналитический подход к определению коэффициента связи между подводимой к модулю имитатора мощностью и интенсивностью его излучения.

Представленный ниже аналитический подход к определению зависимости интенсивности излучения модуля имитатора от подводимой к нему электрической мощности продемонстрируем на примере рассмотрения инфракрасного имитатора (ИКИ) установки ВК600/300. Этот имитатор создавался в свое время для испытания специального цилиндрического объекта, диаметром, не превышающим 2,6 м. С целью повышения

коэффициента полезного использования подводимой к имитатору энергии излучатель модуля (токопроводящая лента) заключалась в специальный отражатель, ограничивающий угол выхода излучения в плоскости, перпендикулярной оси модуля и, следовательно, плоскости, перпендикулярной оси объекта. Этот угол, отсчитываемый от центральной продольной плоскости модуля, составляет величину, приблизительно равную 30° . Исходя из величины этого угла, а также исходя из особенностей оптической схемы системы излучатель-отражатель, была составлена индикатриса излучения модуля на выходе из плоскости среза отражателя. Можно считать, что индикатриса излучения $\Phi(\vec{r})$ зависит только от угла θ , отсчитываемого в плоскости перпендикулярной продольной оси модуля. Причем эта зависимость может быть представлена в виде: при $|\theta| \leq .523$ $\Phi(\theta) = 1$, при $|\theta| > .523$ $\Phi(\vec{r}) = 0$.

Воспользуемся этой индикатрисой и компьютерной программой определения оптимального распределения интенсивности излучения модулей имитатора для реализации облученности бесконечно длинной черной поверхности, соосно размещенной в бесконечно длинном имитаторе с числом модулей, равным 48. Допустим, поверхность цилиндра должна подвергнуться воздействию однородного потока плотностью $400 \frac{Bm}{m^2}$ ($q_w = 400$).

Предположим, что коэффициент η полезного использования подводимой к модулю энергии равен 0,8. Вся энергия излучения имитатора при заданной индикатрисе излучения его модулей попадает на облучаемую поверхность. Расчеты, выполненные с помощью компьютерной программы оптимизации режима работы имитатора, показывают, что при $q_w = 400 \frac{Bm}{m^2}$ величина $J(j) \approx 4258 \frac{Bm}{m^2 \text{стерад}}$. Сопоставляя мощность модуля единичной

длины $W(j) = \frac{q_w \cdot \pi \cdot d}{\eta \cdot n}$ с величиной интенсивности его излучения получаем коэффициент $C \approx 0.019$. Для двухметрового модуля $C \approx 0.038$.

Выводы по главе 3.

Из двух рассмотренных подходов к определению зависимости интенсивности излучения модуля имитатора от подводимой электрической мощности наиболее предпочтительным является экспериментальный подход. При использовании аналитического подхода вводятся спорные предположения, касающиеся индикатрисы излучения модуля и величины коэффициента полезного использования подводимой к модулю энергии.

4. ИЛЛЮСТРАЦИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРАБОТАННОГО МЕТОДИЧЕСКОГО ПОДХОДА К ОПРЕДЕЛЕНИЮ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ИНФРАКРАСНЫХ ИМИТАТОРОВ.

В данной главе представлены результаты работы в обеспечение проведения испытаний двух создаваемых в НПО им. С.А. Лавочкина изделий «Спектр-РГ» и «Луна-Глоб» в установке ВК600/300. Для первого изделия предусмотрено проведение комплексных электрических испытаний. Для второго – планируется проведение тепловакуумных испытаний. До стадии осуществления разработки методического и программного обеспечения проведения отмеченных испытаний весьма важным является вопрос о возможности качественного проведения этих испытаний в условиях установки ВК600/300.

Комплексные электрические испытания штатных изделий последние годы стали проводить в тепловакуумных установках в условиях моделирования космического вакуума при поддержании требуемого теплового режима всех жизненно важных элементов испытываемого объекта. В средних и крупных по объему вакуумных камерах, в том числе и в камере ВК600/300, в качестве средств основной откачки используются насосы поверхностного действия крио-конденсационного типа – экраны, охлаждаемые жидким или кипящим азотом. Поэтому достижение и поддержание в камере требуемого уровня вакуума ($P \leq 10^{-5} \text{ торр}$) сопряжено с необходимостью поддержания на экранах достаточно низких температур (менее 90К) с тем, чтобы конденсировать и вымораживать на них газы и пары, выделяемые испытываемым объектом и элементами самой экспериментальной установки. В связи с этим возникает необходимость подвода к испытываемому объекту энергии, компенсирующей его потери и обеспечивающей в нем требуемый тепловой режим.

В состав систем установки ВК600/300, моделирующих штатные условия функционирования КА, помимо откачных средств входят имитатор

солнечного излучения и инфракрасный имитатор (ИКИ), выполненный в виде совокупности условно линейчатых излучателей (модулей), которые могут располагаться вокруг испытуемого объекта. При наличии в камере такого имитатора нет необходимости в использовании имитатора солнечного излучения в качестве средства компенсации рассеиваемой объектом энергии. Солнечный имитатор может обеспечить лишь односторонний подогрев и, следовательно, должен работать вместе с инфракрасным имитатором. Для создания в камере изотропного (по возможности) поля лучистых потоков имитатор солнечного излучения может играть лишь вспомогательную роль, а основным средством моделирования такого поля может служить лишь инфракрасный имитатор. Принимая во внимание высокую стоимость эксплуатации солнечного имитатора и ожидаемую незначительную выгоду, а вероятнее всего отсутствие таковой, для термостатирования испытуемого объекта целесообразно использовать только инфракрасный имитатор.

В процессе проведения испытаний к модулям имитатора должны подводиться такие электрические мощности, чтобы заданные значения температур наружной поверхности испытуемого объекта воспроизводились в условиях экспериментальной установки с максимально возможной точностью.

4.1. Решение задачи термостатирования изделия «Спектр-РГ» при проведении его комплексных электрических испытаний.

4.1.1. Геометрическая и радиационная модель инфракрасного имитатора.

Для решения задачи термостатирования изделия «Спектр-РГ» предполагается использование инфракрасного имитатора (ИКИ) установки ВК600/300, выполненного в виде совокупности излучающих модулей, которые могут определенным образом располагаться относительно

испытываемого объекта. Модули ИКИ содержат излучатели в виде токопроводящих стеклографитовых лент шириной 13 мм. В инфракрасной области спектра такие излучатели можно считать серыми с интегральной степенью черноты приблизительно равной 0,9. Излучатели размещаются в отражателях корытообразного сечения. Однако отражатели могут и не устанавливаться. В имитаторе используются модули метровой и двухметровой длины. В данных испытаниях большинство модулей, оснащенных отражателями, будут располагаться вдоль образующих поверхности кругового цилиндра диаметром 4,95 м. Это так называемые боковые или вертикально расположенные модули. Ширина выходного сечения отражателя таких модулей составляет 80 мм. Излучение модуля с отражателем испускается в сторону рабочей зоны имитатора не в полусферу, а в ограниченном в поперечном сечении телесном угле. Если характеризовать этот угол линейным углом, отсчитываемым от оси модуля, то он соответствует приблизительно 30° .

Боковые модули по высоте размещаются в 6 ярусах. В каждом ярусе по 24 модуля, расположенных равномерно по окружности. Модули первого и пятого ярусов имеют двухметровую длину. Модули второго-четвертого и шестого ярусов имеют длину 1 м.

Нижние концы модулей 1-го яруса возвышаются над плоскостью опорно-поворотного стола на расстоянии 1 м. Для модулей боковой поверхности имитатора принят следующий принцип нумерации. В первом ярусе располагаются первые 24 излучателя, во втором ярусе излучатели с номерами 25-48, в третьем - излучатели с номерами 49-72. В четвертом - с номерами 73-96, в пятом модули с номерами 97-120. В шестом модули с номерами 121-144.

Первые модули в каждом ярусе размещены так, что соответствующий им полярный угол приблизительно равен 45° в стендовой системе координат,

в которой ось OX направлена на имитатор солнечного, а ось OZ является вертикальной осью.

Для термостатирования верхних и нижних торцевых поверхностей испытуемого объекта необходимо использовать торцевые модули двухметровой длины, размещаемые в плоскостях, перпендикулярных оси камеры. Представляется целесообразным установить на верхней торцевой поверхности 6 модулей, а на нижней - не более 4. Нижняя торцевая поверхность в силу своего расположения относительно боковых излучателей не подвергается воздействию исходящего от них излучения. В связи с этим оптимизация режима работы боковых и верхних торцевых модулей может осуществляться без учета наличия нижних торцевых модулей, которые будут участвовать лишь в термостатировании нижней торцевой поверхности. Решать задачу термостатирования испытуемого объекта с помощью ИКИ надлежит в условиях наличия в экспериментальной установке потоков излучения, приходящих на испытуемый объект от экранов вакуумной камеры по различным направлениям. Наличие этих анизотропных по направлению и различных по плотности лучистых потоков обусловлено не столько неоднородностью поля температур по поверхности криогенных экранов, сколько наличием в этих экранах необходимых конструктивных и технологических вырезов, большинство из которых прикрыты неохлаждаемыми экранами. Это неоднородное по объему экспериментальной установки и направлениям излучение – так называемое фоновое излучение, может привести к заметным погрешностям в воспроизведении заданного однородного (по возможности) поля температур на наиболее важных участках поверхности испытуемого объекта. Кроме того, во время работы инфракрасного имитатора появляется более мощный источник фонового излучения – отраженный от отражателей излучающих модулей имитатора лучистый поток, источником которого является излучение противоположно расположенных модулей самого имитатора. Площади поверхности среза

отражателей составляет несколько более 10% от площади цилиндрической поверхности, проходящей через выходные сечения отражателей. Следовательно, при высокой отражательной способности покрытия поверхности отражателей, в рабочую зону экспериментальной установки по некоторым направлениям может вернуться, по оценкам, до 8% излучения модулей имитатора, что приведет к появлению 2-х процентных температурных погрешностей на теплоизолированных элементах испытуемого объекта.

4.1.2. Геометрическая и радиационная модель испытуемого объекта.

Вводилась в рассмотрение упрощенная геометрическая модель термостатируемой поверхности изделия «Спектр-РГ». Реальная сложная по геометрической конфигурации боковая поверхность испытуемого объекта заменялась поверхностями двух стыкающихся цилиндрическими поверхностями, отличающимися высотой, формой и размерами направляющих линий. Нижняя и верхняя части объекта моделируются круглыми торцевыми поверхностями. Нижняя цилиндрическая поверхность, являющаяся поверхностью кругового цилиндра с диаметром 2,4 м и высотой 1,8 м, а также нижняя торцевая поверхность моделируют поверхности модуля «Навигатор» и адаптера. Верхняя цилиндрическая поверхность высотой 3,3 м осуществляет моделирование расположенных рядом двух телескопов. Направляющая линия этой поверхности образована двумя частями окружностей (близкими к полуокружностям) и касательными к ним. Диаметры окружностей соответствуют средним диаметрам параллельно расположенным телескопам большого и малого диаметра. Боковая поверхность модели изделия рассекалась сотней секущих плоскостей с шагом приблизительно равным 5 см. В каждом сечении задавались цилиндрические координаты – 48 точек, являющиеся центрами элементарных площадок. Таким образом, на боковых поверхностях

аппроксимирующих цилиндров заданы координаты 4800 точек, являющиеся центрами элементарных площадок, которые будут подвергаться воздействию излучения модулей имитатора. При этом задаются углы, характеризующие ориентацию нормалей всех площадок. На каждой из торцевых поверхностей задавались координаты 192 точек, расположенных на четырех окружностях с радиусами 0,3; 0,5; 0,7; 0,9 м. На каждой окружности равномерно с угловым шагом $7,5^\circ$ размещаются по 48 точек. Все эти точки также являются центрами элементарных площадок, подвергающихся воздействию излучения модулей имитатора. В итоге на поверхности модели испытываемого объекта выделяются 5184 элементарных площадок.

Не без основания принималось предположение о том, что поверхность испытываемого объекта имеет однородные радиационные характеристики. Предполагалось, что поглощательная способность поверхности по отношению к солнечному излучению $A_s = 0,29$, а степень черноты $\varepsilon = 0,55$. Такие радиационные характеристики имеет желтая ариמידная ткань, используемая в качестве облицовочной для матов экранно-вакуумной теплоизоляции, которыми экранируется большая часть поверхности испытываемого объекта. При этом следует заметить, что поглощательная способность поверхности объекта по отношению к излучению имитатора практически будет равна ε .

4.1.3. Результаты решения задачи.

Определялись шесть режимов работы имитатора. Эти режимы отличались значениями температур T_0 , которые должны воспроизводиться на поверхности испытываемого объекта. Рассматривались случаи, когда температура T_0 принималась равной $(-20^\circ; -10^\circ; 0^\circ; 10^\circ; 20^\circ; 30^\circ) \text{C}$.

Режим работы имитатора определялся с использованием градиентного метода минимизации целевой функции.

Ниже в таблицах 4 и 5 представлены с соответствующими комментариями результаты решения задачи для двух значений T_0 : 10°C и 30°C

Таблица 4

<p>$T=10^\circ\text{C}$ - воспроизводимая температура поверхности испытуемого объекта.</p> <p>Весовые коэффициенты у тепловоспринимающих элементов одинаковые.</p> <p>Относительные значения величин интенсивности излучения модулей имитатора, размещенных на боковой поверхности, по отношению к максимальной интенсивности излучения одного из модулей.</p> <p>J-номер яруса.</p>											
J=1											
0.31	0.14	0.10	0.26	0.32	0.07	0.26	0.15	0.15	0.26	0.24	0.05
0.30	0.12	0.28	0.24	0.07	0.28	0.18	0.17	0.11	0.24	0.21	0.05
J=2											
0.24	0.16	0.03	0.10	0.17	0.00	0.09	0.09	0.28	0.09	0.23	0.00
0.30	0.00	0.10	0.18	0.00	0.21	0.16	0.11	0.03	0.24	0.19	0.00
J=3											
0.27	0.15	0.06	0.28	0.31	0.00	0.26	0.08	0.27	0.14	0.20	0.00
0.36	0.00	0.25	0.21	0.01	0.21	0.19	0.13	0.11	0.18	0.25	0.00
J=4											
0.26	0.19	0.03	0.12	0.19	0.00	0.22	0.07	0.29	0.10	0.24	0.01
0.34	0.00	0.21	0.24	0.01	0.22	0.22	0.14	0.09	0.22	0.23	0.00
J=5											
0.26	0.12	0.08	0.22	0.31	0.01	0.10	0.15	0.25	0.13	0.19	0.01
0.30	0.00	0.19	0.18	0.00	0.08	0.25	0.12	0.04	0.22	0.21	0.00
J=6											
0.36	0.42	0.10	0.00	0.00	0.00	0.92	0.05	0.00	0.15	1.00	0.00
0.00	0.61	0.16	0.62	0.26	0.39	0.02	0.69	0.42	0.00	0.41	0.20
Торцевые модули											
.00	.00	.00	.00	.00	.00	.11	.06	.12	.16		
Величины электрических мощностей, подводимых к модулям боковой поверхности имитатора, [Вт].											
J=1											
298	133	94	247	304	62	245	140	246	145	231	44
281	119	262	228	64	269	172	164	108	231	197	48
J=2											
114	76	12	47	79	0	43	43	134	41	109	0
143	0	47	84	0	51	102	74	15	112	91	0

J=3											
128	71	28	131	149	0	122	39	130	67	97	0
172	0	121	101	4	102	92	62	54	85	119	0
J=4											
24	91	14	59	90	0	105	33	140	46	116	6
161	0	101	114	3	103	107	69	40	104	107	0
J=5											
244	110	74	208	297	10	99	142	237	127	181	6
282	4	185	167	0	73	241	114	39	211	199	0
J=6											
171	200	47	0	0	0	436	22	0	72	475	0
0	291	78	292	125	187	7	326	199	0	194	95
Торцевые модули – 5 верхних, 5 нижних											
0	0	0	0	1	0	100	60	115	154		
Величина суммарной электрической мощности подводимой к имитатору, [Вт].											
16254											
Среднеинтегральная и среднеквадратичная по поверхности испытуемого объекта погрешности воспроизведения требуемых тепловых потоков											
0.00	0.01										
Температурные погрешности воспроизведения заданной температуры поверхности боковой поверхности объекта в точках поперечных сечений, находящихся друг от друга на расстоянии приблизительно 0,03 м, отсчитывая от нижней торцевой плоскости											
J= 1											
-2.54	-3.20	-2.80	-2.86	-2.72	-3.51	-2.58	-3.09	-2.27	-2.25	-3.18	-2.49
-2.50	-2.76	-2.31	-2.42	-3.08	-3.27	-2.69	-2.44	-2.39	-2.53	-3.23	-2.82
-2.96	-2.48	-3.62	-2.59	-2.74	-2.80	-2.97	-2.88	-2.63	-3.29	-2.46	-2.68
-2.53	-3.06	-2.79	-2.98	-3.22	-3.16	-2.51	-3.13	-2.74	-3.34	-2.60	-3.21
J= 10											
1.02	0.52	0.95	0.90	1.06	0.27	1.18	0.50	1.30	1.19	0.22	0.91
0.97	0.67	1.13	1.06	0.35	0.22	0.82	1.08	1.13	0.94	0.26	0.75
0.57	1.43	0.05	1.12	0.90	0.81	0.64	0.76	0.98	0.32	1.14	0.92
1.12	0.58	0.89	0.77	0.45	0.59	1.37	0.51	1.14	0.49	1.14	0.36
J= 19											
1.07	0.66	1.00	0.90	1.09	0.38	1.30	0.40	1.18	0.97	0.03	0.72
0.93	0.58	1.03	1.02	0.28	0.22	0.82	1.08	1.09	0.82	0.29	0.85
0.52	1.74	0.09	1.21	0.98	0.86	0.73	0.87	1.02	0.37	1.15	0.94
1.21	0.70	1.02	0.98	0.49	0.68	1.63	0.51	1.37	0.62	1.22	0.38
J= 28											
0.02	-0.35	-0.11	-0.28	-0.08	-0.69	0.28	-0.75	0.08	-0.20	-1.12	-0.41
-0.09	-0.50	-0.06	-0.03	-0.79	-0.80	-0.23	0.02	-0.01	-0.36	-0.71	-0.13
-0.64	0.80	-1.04	0.13	-0.12	-0.26	-0.36	-0.21	-0.13	-0.78	-0.04	-0.24
0.09	-0.39	-0.07	-0.06	-0.71	-0.49	0.61	-0.68	0.34	-0.49	0.11	-0.71
J= 37											

-0.34	-0.64	-0.37	-0.60	-0.47	-1.05	0.03	-0.96	-0.03	-0.29	-1.27	-0.54
-0.20	-0.64	-0.21	-0.20	-0.97	-0.99	-0.43	-0.20	-0.27	-0.68	-0.93	-0.35
-0.93	0.39	-1.47	-0.24	-0.50	-0.66	-0.73	-0.58	-0.55	-1.24	-0.51	-0.70
-0.36	-0.79	-0.52	-0.50	-1.21	-1.02	0.15	-1.18	-0.05	-0.88	-0.25	-1.04
J= 46											
0.08	-0.17	0.20	-0.05	0.00	-0.58	0.57	-0.32	0.67	0.44	-0.61	0.14
0.45	0.01	0.44	0.44	-0.34	-0.39	0.18	0.42	0.33	-0.12	-0.40	0.12
-0.41	0.71	-1.02	0.28	0.03	-0.12	-0.16	-0.02	0.01	-0.73	0.01	-0.18
0.16	-0.24	-0.01	0.01	-0.68	-0.55	0.60	-0.74	0.39	-0.44	0.22	-0.57
J= 55											
0.50	0.23	0.63	0.41	0.47	-0.10	0.98	0.01	0.91	0.63	-0.42	0.35
0.68	0.26	0.71	0.73	-0.05	-0.08	0.53	0.81	0.74	0.28	-0.08	0.34
0.08	1.18	-0.41	0.85	0.58	0.45	0.43	0.58	0.62	-0.13	0.62	0.44
0.78	0.42	0.63	0.67	0.03	0.13	1.26	-0.06	0.95	0.08	0.74	-0.05
J= 64											
0.53	0.18	0.53	0.35	0.47	-0.09	0.89	-0.27	0.50	0.15	-0.85	-0.08
0.29	-0.12	0.35	0.40	-0.36	-0.36	0.27	0.58	0.54	0.11	-0.24	0.20
0.11	1.34	-0.26	0.85	0.53	0.42	0.41	0.56	0.62	-0.15	0.61	0.44
0.79	0.45	0.66	0.75	0.15	0.25	1.39	0.19	1.05	0.16	0.83	0.03
J= 73											
0.11	-0.23	0.07	-0.13	0.00	-0.55	0.48	-0.62	0.22	-0.09	-1.02	-0.29
0.05	-0.39	0.06	0.09	-0.63	-0.67	-0.10	0.16	0.12	-0.27	-0.54	0.02
-0.45	0.86	-0.90	0.28	-0.03	-0.11	-0.15	-0.02	0.04	-0.75	0.00	-0.18
0.16	-0.18	0.00	0.15	-0.50	-0.43	0.69	-0.46	0.43	-0.43	0.30	-0.46
J= 82											
-0.36	-0.63	-0.35	-0.60	-0.50	-1.05	0.17	-0.65	0.42	-0.6	0.25	0.01
0.28	-0.20	0.20	0.18	-0.49	-0.64	-0.18	-0.01	-0.06	-0.43	-0.68	-0.07
-1.16	0.18	-1.75	-0.25	-0.51	-0.54	-0.62	-0.53	-0.45	-1.29	-0.54	-0.75
-0.45	-0.80	-0.70	-0.47	-1.18	-1.19	-0.18	-1.43	-0.39	-1.21	-0.38	-1.06
J= 91											
-0.04	-0.28	0.03	-0.23	-0.11	-0.75	0.43	-0.38	0.69	0.56	-0.25	0.29
0.32	-0.26	0.09	0.34	-0.29	-0.41	0.13	0.42	0.41	-0.08	-0.64	0.07
-0.76	0.55	-1.38	0.32	-0.07	-0.04	-0.17	-0.08	0.09	-0.77	0.01	-0.23
0.03	-0.35	-0.29	0.12	-0.49	-0.53	0.27	-1.02	0.13	-0.74	0.06	-0.68
J= 100											
1.77	1.50	2.02	1.90	2.10	1.16	1.62	.11	.62	.20	-.64	-.45
-.89	-.53	.04	.12	-.27	-.46	.72	2.10	2.67	1.71	-.34	.79
2.53	3.47	1.58	2.71	1.77	1.86	1.67	1.84	2.25	1.41	2.26	2.02
2.25	1.84	1.95	2.70	2.55	2.62	3.30	2.56	3.67	2.48	2.78	1.61

Таблица 5

Т=30°C -воспроизводимая температура поверхности испытуемого объекта.											
Весовые коэффициенты у тепловоспринимающих элементов одинаковые.											
Относительные значения величин интенсивности излучения модулей имитатора, размещенных на боковой поверхности, по отношению к максимальной интенсивности излучения одного из модулей											
J-номер яруса											
J=1											
043	0.17	0.13	0.36	0.41	0.08	0.34	0.19	0.34	0.20	0.33	0.05
0.40	0.16	0.36	0.32	0.09	0.37	0.24	0.24	0.13	0.33	0.27	0.05
J=2											
0.30	0.24	0.01	0.14	0.22	0.00	0.11	0.13	0.36	0.13	0.30	0.00
0.39	0.00	0.14	0.22	0.00	0.15	0.28	0.19	0.07	0.28	0.27	0.00
J=3											
0.36	0.19	0.07	0.37	0.41	0.00	0.35	0.10	0.36	0.19	0.27	0.00
0.48	0.00	0.32	0.29	0.01	0.28	0.26	0.17	0.14	0.25	0.32	0.00
J=4											
0.35	0.24	0.05	0.16	0.24	0.00	0.26	0.11	0.39	0.12	0.33	0.01
0.44	0.00	0.30	0.31	0.00	0.29	0.29	0.19	0.11	0.29	0.29	0.00
J=5											
0.34	0.16	0.08	0.29	0.42	0.01	0.17	0.17	0.35	0.14	0.29	0.00
0.39	0.00	0.25	0.23	0.00	0.11	0.33	0.16	0.05	0.29	0.27	0.00
J=6											
0.51	0.50	0.20	0.00	0.00	0.03	1.00	0.14	0.00	0.48	1.00	0.00
0.00	1.00	0.11	0.80	0.32	0.56	0.01	0.82	0.65	0.00	0.49	0.26
Торцевые модули											
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14	0.08	0.16	0.21		
Величины электрических мощностей, подводимых к модулям боковой поверхности имитатора, [Вт].											
J=1											
410	162	120	339	391	80	327	182	323	189	309	51
375	153	341	305	86	348	227	224	128	315	258	52
J=2											
141	114	7	65	103	0	52	63	170	60	140	0
187	0	69	103	0	72	131	92	31	135	127	0
J=3											

173	89	35	177	194	0	168	46	170	88	129	0
227	0	153	136	4	134	123	82	67	117	152	0
J=4											
65	116	24	78	115	0	125	52	185	57	155	6
209	0	144	145	0	138	138	92	51	139	139	0
J=5											
322	153	78	272	402	9	157	161	333	130	271	0
374	0	237	218	0	107	312	148	52	280	259	0
J=6											
244	236	94	0	0	14	475	68	0	226	475	0
0	475	54	379	153	267	6	389	308	0	232	122
Торцевые модули; 5-нижних, 5 верхних											
0	0	0	0	1	0	135	79	151	197		
Величина суммарной электрической мощности подводимой к имитатору, [Вт].											
21350											
Среднеинтегральная и среднеквадратичная по поверхности испытуемого объекта погрешности воспроизведения требуемых тепловых потоков											
0.00	0.01										
Температурные погрешности воспроизведения заданной температуры поверхности боковой поверхности объекта в точках поперечных сечений, находящихся друг от друга на расстоянии приблизительно 0,03 м отсчитывая от нижней торцевой плоскости											
J= 1											
-2.67	-3.45	-3.04	-3.04	-2.87	-3.77	-2.79	-3.32	-2.43	-2.40	-3.39	-2.66
-2.65	-2.94	-2.47	-2.60	-3.28	-3.49	-2.86	-2.61	-2.56	-2.70	-3.47	-3.05
-3.15	-2.65	-3.86	-2.75	-2.96	-3.02	-3.20	-3.08	-2.81	-3.52	-2.64	-2.89
-2.71	-3.30	-2.97	-3.17	-3.45	-3.40	-2.70	-3.33	-2.94	-3.58	-2.81	-3.44
J= 13											
1.43	0.89	1.31	1.29	1.49	0.64	1.60	0.80	1.65	1.51	0.46	1.19
1.32	0.97	1.46	1.40	0.65	0.52	1.17	1.45	1.49	1.27	0.57	1.13
0.90	1.94	0.37	1.55	1.29	1.18	1.02	1.16	1.38	0.67	1.53	1.30
1.54	0.96	1.31	1.22	0.81	0.96	1.86	0.86	1.62	0.88	1.54	0.70
J= 25											
0.36	-0.03	0.26	0.07	0.30	-0.37	0.65	-0.44	0.43	0.15	-0.85	-0.11
0.21	-0.21	0.27	0.29	-0.51	-0.54	0.08	0.35	0.34	0.02	-0.43	0.21
-0.32	1.18	-0.75	0.51	0.25	0.11	0.00	0.16	0.27	-0.44	0.37	0.16
0.49	-0.04	0.31	0.31	-0.33	-0.11	1.01	-0.33	0.74	-0.14	0.49	-0.39
J= 37											
-0.38	-0.68	-0.38	-0.66	-0.51	-1.11	0.03	-1.03	-0.03	-0.31	-1.36	-0.59
-0.21	-0.68	-0.22	-0.20	-1.02	-1.05	-0.45	-0.20	-0.28	-0.71	-1.04	-0.38
-0.99	0.43	-1.57	-0.25	-0.54	-0.71	-0.78	-0.63	-0.60	-1.34	-0.56	-0.75
-0.39	-0.85	-0.57	-0.53	-1.28	-1.08	0.16	-1.27	-0.05	-0.95	-0.27	-1.11
J= 55											
0.55	0.24	0.66	0.44	0.52	-0.12	1.05	0.02	0.99	0.69	-0.46	0.35

0.72	0.27	0.75	0.77	-0.05	-0.08	0.57	0.87	0.79	0.30	-0.09	0.40
0.08	1.26	-0.45	0.90	0.63	0.49	0.46	0.62	0.67	-0.14	0.67	0.49
0.85	0.45	0.67	0.71	0.02	0.14	1.35	-0.05	1.01	0.09	0.80	-0.06
J= 67											
0.48	0.08	0.41	0.23	0.38	-0.23	0.83	-0.40	0.41	0.02	-1.08	-0.27
0.14	-0.31	0.19	0.25	-0.55	-0.53	0.13	0.45	0.42	-0.02	-0.30	0.25
-0.05	1.29	-0.48	0.73	0.42	0.31	0.29	0.45	0.52	-0.31	0.51	0.33
0.70	0.32	0.53	0.64	-0.02	0.09	1.32	0.08	1.00	0.05	0.78	-0.09
J= 79											
-0.24	-0.56	-0.28	-0.51	-0.39	-1.01	0.24	-0.73	0.33	0.10	-0.89	-0.13
0.19	-0.29	0.16	0.17	-0.60	-0.68	-0.14	.007	-0.02	-0.50	-0.80	-0.16
-1.02	0.46	-1.55	-0.14	-0.46	-0.53	-0.60	-0.48	-0.39	-1.26	-0.46	-0.67
-0.33	-0.71	-0.57	-0.36	-1.10	-1.07	0.05	-1.24	-0.20	-1.09	-0.23	-0.98
J= 91											
-0.03	-0.30	0.02	-0.21	-0.09	-0.82	0.44	-0.41	0.74	0.59	-0.32	0.26
0.33	-0.23	0.17	0.46	-0.30	-0.42	0.19	0.51	0.48	-0.12	-0.80	-0.05
-0.80	0.72	-1.37	0.32	-0.08	-0.07	-0.19	-0.10	0.12	-0.78	0.00	-0.26
.002	-0.42	-0.32	.013	-0.51	-0.55	0.29	-1.08	0.13	-0.82	0.05	-0.72
J= 100											
1.89	1.53	2.04	2.00	2.23	1.21	1.79	0.25	0.78	0.27	-0.74	-0.61
-1.08	-0.62	-0.01	0.13	-0.49	-0.71	0.58	2.11	2.79	1.95	0.05	1.35
2.49	3.58	1.32	2.72	2.01	2.12	1.98	2.09	2.56	1.68	2.47	2.17
2.41	1.90	2.06	2.85	2.67	2.76	3.48	2.76	3.95	2.68	3.06	1.79

Анализируя полученные результаты, можно заключить, что по технической оснащенности, включая количество и расположение модулей инфракрасного имитатора (ИКИ), установка ВК600/300 в состоянии обеспечить качественное термостатирование КА «Спектр-РГ» при проведении комплексных электрических испытаний.

Результаты расчетов, выполненных на основании разработанных методики и компьютерной программы, свидетельствуют о достаточно высокой однородности плотности теплового потока, падающего от ИКИ на поверхность геометрической модели испытуемого объекта .

4.2. Воспроизведение внешних тепловых нагрузок на изделие «Луна-Глоб» при его тепловакуумных испытаниях в установке ВК600/300.

4.2.1. Задачи, решаемые при тепловакуумных испытаниях изделия.

Система обеспечения теплового режима (СОТР) космического аппарата (КА) «Луна-Глоб» включает комплекс пассивных и активных средств обеспечения теплового режима [37]. Наиболее ответственным элементом СОТР КА «Луна-Глоб» является тепловая сотовая панель (ТСП), на которой установлена основная масса блоков служебной и научной аппаратуры, со сроком работы не менее одного года. Тепловой режим ТСП по этой причине должен быть достаточно комфортен, что достигается за счет непрерывного обогрева панели с помощью установленного на нее радиоизотопного термоэлектрического генератора (РИТЭГ) и одновременного регулируемого отвода тепла к двум радиационным теплообменникам с помощью двух регулируемых контурных тепловых труб (КнТТ). Для эффективного отвода тепла от контактных оснований приборов и аппаратуры в сотовую панель встроены аксиальные тепловые трубы (АТТ).

Над ТСП, под прямым углом к ней, то есть горизонтально, установлены два одинаковых радиатора (РТО) прямоугольной формы. Внешние (излучающие) поверхности РТО ориентированы в сторону оси «+X» КА и имеют радиационные характеристики с $A_s \leq 0.2$ и $\varepsilon \geq 0.88$.

С целью сведения к пренебрежимо малой величине нерегулируемого внешнего теплообмена внутреннего оборудования КА, почти вся его поверхность, кроме рабочих поверхностей приборов и внешней поверхности радиаторов, заэкранирована экранно-вакуумной теплоизоляцией (ЭВТИ). По сути основным элементом КА находящимся в условиях космоса в состоянии активного внешнего теплообмена с внешней средой является РТО.

Комплексные тепловакуумные испытания КА «Луна-Глоб» будут проводиться в ВК600/300. В экспериментальной установке объект будет установлен вертикально так, что его ось «+X» будет совпадать с продольной осью камеры «+Z». Внешние тепловые воздействия во время испытаний будут воспроизводиться с помощью инфракрасного имитатора (ИКИ) установки. В связи с особым значением РТО в формировании теплового режима испытуемого объекта энергетический режим работы ИКИ будет выбираться в первую очередь исходя из необходимости обеспечения достаточно высокой точности моделирования расчетных внешних тепловых нагрузок по поверхности РТО.

4.2.2. Геометрическая и радиационная модель используемого имитатора.

Комплексные тепловакуумные испытания изделия «Луна-Глоб» будут проводиться в установке ВК600/ 300 с использованием штатной ее системы вакуумирования и инфракрасного имитатора внешних тепловых нагрузок (ИКИ), выполненного в виде совокупности излучающих модулей, которые могут определенным образом располагаться относительно испытуемого объекта. Модули ИКИ содержат излучатели в виде токопроводящих стеклографитовых лент шириной 13 мм. В инфракрасной области спектра такие излучатели можно считать серыми с интегральной степенью черноты приблизительно равной 0,9. Излучатели размещаются в отражателях корытообразного сечения. Однако, отражатели могут и не устанавливаться. В имитаторе будут использоваться модули метровой длины. Эти модули располагаются вдоль образующих поверхности кругового цилиндра диаметром 4,95 м и соосного с вакуумной камерой. Это так называемые боковые или вертикально расположенные модули. Ширина выходного сечения отражателя таких модулей составляет 80 мм. Излучение модуля с отражателем испускается в сторону рабочей зоны имитатора не в полусферу, а в ограниченном в поперечном сечении телесном угле. Если характеризовать

этот угол линейным углом, отсчитываемым от оси модуля, то он соответствует приблизительно 30° . Кроме вертикально расположенных боковых модулей в испытаниях будут использоваться торцевые модули, размещаемые в плоскостях, перпендикулярных оси камеры.

Боковые модули по высоте размещаются в 5 ярусах. В каждом ярусе по 24 расположенных равномерно по окружности модуля. Для проведения данных испытаний оптический отсек установки ВК 600/300 должен закрываться криогенными экранами, а модули ИКИ в этой зоне размещаются с таким же угловым шагом, как и все остальные боковые модули – 7.5° .

Для моделирования внешней тепловой нагрузки на торцевые поверхности испытуемого объекта могут использоваться торцевые модули метровой или двухметровой длины, размещаемые в плоскостях, перпендикулярных оси камеры. Планируется установить на верхней и нижней торцевых поверхностях по 2 модуля параллельно друг другу с шагом 1 м.

Решать задачу воспроизведения внешних тепловых нагрузок на испытуемый объект с помощью ИКИ надлежит в условиях наличия в экспериментальной установке потоков излучения, приходящих на объект от экранов вакуумной камеры по различным направлениям. Наличие этих анизотропных по направлению и различных по плотности лучистых потоков обусловлено не столько неоднородностью поля температур по поверхности криогенных экранов, сколько наличием в этих экранах необходимых конструктивных и технологических вырезов, большинство из которых прикрыты неохлаждаемыми экранами. Это неоднородное по объему экспериментальной установки и направлениям излучение - так называемое фоновое излучение, может привести к заметным погрешностям в воспроизведении заданных тепловых нагрузок на наиболее важных участках поверхности испытуемого объекта. Кроме того, во время работы инфракрасного имитатора появляется более мощный источник фонового

излучения – отраженный от отражателей излучающих модулей имитатора лучистый поток, источником которого является излучение противоположно расположенных модулей самого имитатора. Площади поверхности среза отражателей составляет несколько более 10% от площади цилиндрической поверхности, проходящей через выходные сечения отражателей. Следовательно, при высокой отражательной способности покрытия поверхности отражателей, в рабочую зону экспериментальной установки по некоторым направлениям может вернуться, по оценкам, до 8% излучения модулей имитатора, что приведет к появлению 2-х процентных температурных погрешностей на теплоизолированных элементах испытуемого объекта.

Нижние концы модулей 1-го яруса возвышаются над плоскостью опорно-поворотного стола на расстоянии 1м. Для модулей боковой поверхности имитатора принят следующий принцип нумерации. В первом ярусе располагаются первые 24 излучателя, во втором ярусе излучатели с номерами 25 - 48, в третьем - излучатели с номерами 49 - 72. В четвертом - с номерами 73 -96 , в пятом модули с номерами 97 -120.

Первые модули в каждом ярусе размещены так, что соответствующий им полярный угол приблизительно равен 45° в стендовой системе координат, в которой ось Ox направлена на имитатор солнечного, а ось Oz является вертикальной осью.

4.2.3. Геометрическая и радиационная модель испытуемого объекта, используемая для определения энергетического режима работы ИКИ.

Внешний вид объекта представлен на рис. 4.1, заимствованном из [37]. На этом рисунке не изображена экранно-вакуумная теплоизоляция, прикрывающая с внешней стороны большую часть поверхности объекта и в значительной степени сглаживающая форму внешней поверхности КА.

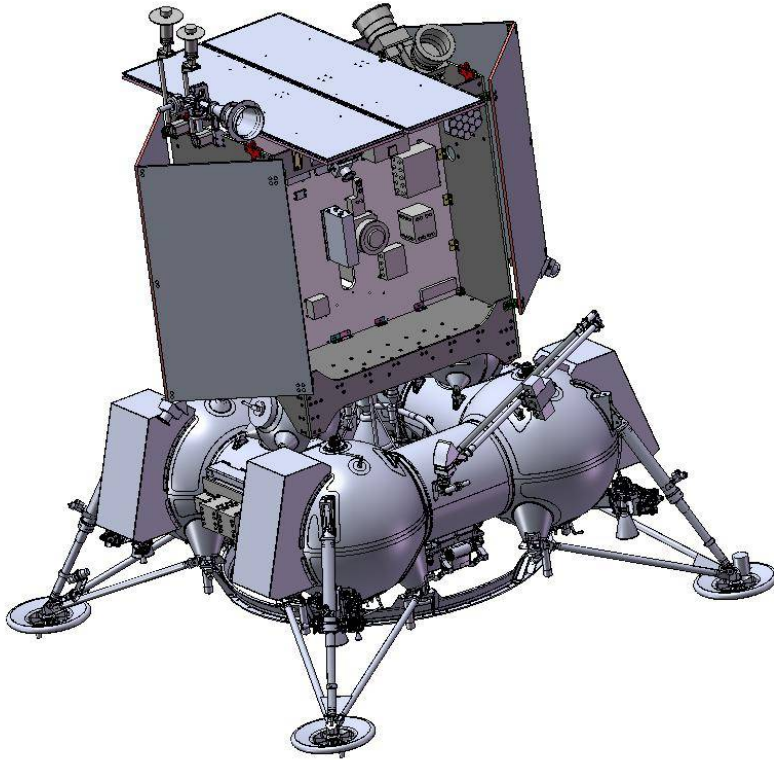


Рис.4.1

Введем в рассмотрение упрощенную геометрическую модель внешней поверхности изделия “Луна-Глоб”. Реальную сложную по геометрической конфигурации боковую поверхность испытуемого объекта заменим поверхностью кругового цилиндра с диаметром 2 м.. Нижняя и верхняя части объекта моделируются круглыми торцевыми поверхностями. Боковая поверхность модели изделия рассечена сотней секущих плоскостей с шагом приблизительно равным 3 см. В каждом сечении заданы цилиндрические координата 48 точек, являющиеся центрами элементарных площадок. Таким образом, на боковой поверхности цилиндра заданы координаты 4800 точек, являющимися центрами элементарных площадок, которые будут подвергаться воздействию излучения модулей имитатора. При этом задаются углы, характеризующие ориентацию нормалей всех площадок.

На каждой из торцевых поверхностей задается 96 точек, расположенных на четырех окружностях с радиусами 0,3 ; 0,5 ; 0,7; 0,9 м. На каждой окружности равномерно с угловым шагом 15° размещаются по 24

точки. Все эти точки также являются центрами элементарных площадок, подвергающихся воздействию излучения, исходящего от модулей имитатора. В итоге на поверхности модели испытуемого объекта выделяются 4992 элементарных площадок.

Условно будем считать, что верхняя торцевая поверхность модели испытуемого объекта имеет покрытие, по радиационным свойствам соответствующее покрытию радиационного теплообменника изделия. А именно: $A_s \in [0.15; 0.3]$, $\varepsilon \approx 0.88$. В таком случае поглощательная способность верхней торцевой поверхности по отношению к излучению, исходящему от модулей ИКИ можно принять равным ε . Радиационные характеристики всех остальных поверхностей модели будем считать такими же, как у арамидной облицовочной ткани, то есть: $A_s \approx 0.3$, $\varepsilon \approx 0.55$.

4.2.4. Анализ внешних тепловых нагрузок, действующих на КА «Луна-Глоб» на окололунной орбите и на поверхности Луны

Непродолжительное пребывание КА на орбите ИСЗ в сборке с разгонным блоком не приводит к возникновению экстремальной ситуации с точки зрения его теплового режима [37]. Действительно, из внешних элементов КА “Луна-Глоб” наибольшее внимание заслуживает расположенный над приборным отсеком КА радиационный теплообменник (РТО), поскольку тепловой поток от РИТЭГ и аппаратуры служебного комплекса, постоянно подводимый к ТСП, сбрасывается с помощью РТО.

Однако следует заметить, что согласно представленным в [37] результатам расчета на опорной околоземной орбите при инерциальной ориентации КА плотность падающего на РТО солнечных потоков может составлять величину $700 \frac{вт}{м^2}$. Но здесь необходимо иметь в виду одно важное обстоятельство: На начальной стадии эксплуатации изделия терморегулирующее покрытие РТО имеет минимально возможное значения

поглощательной способности по отношению к солнечному излучению ($A_s \leq 0.15$). Следовательно плотность поглощаемого поверхностью РТО будет невелика.

На этапе перелета характер внешних потоков на КА постоянный и не требует иллюстраций. Компоновка КА «Луна-Глоб» выполнена таким образом, что любое положение КА на перелете, включая вращение КА вокруг оси «Х» будет менее критичным, чем условия штатного функционирования на поверхности Луны. При этом, для этапа перелета подразумевается выполнение требования по допустимой величине угла «SOX», который ограничивает величину солнечного потока на РТО КА. При анализе внешних потоков, падающих на различные поверхности КА «Луна-Глоб» на орбите ИСЛ, преимущественный интерес представляют величины потоков попадающие на РТО для опорной орбиты с инерциальным положением КА и для посадочной орбиты с орбитальным положением КА (т.е. для «+X» направленного против вектора скорости).

Расчетные значения соответствующих внешних потоков даны на рисунках 4.2 - 4.4 заимствованных из работы [37].

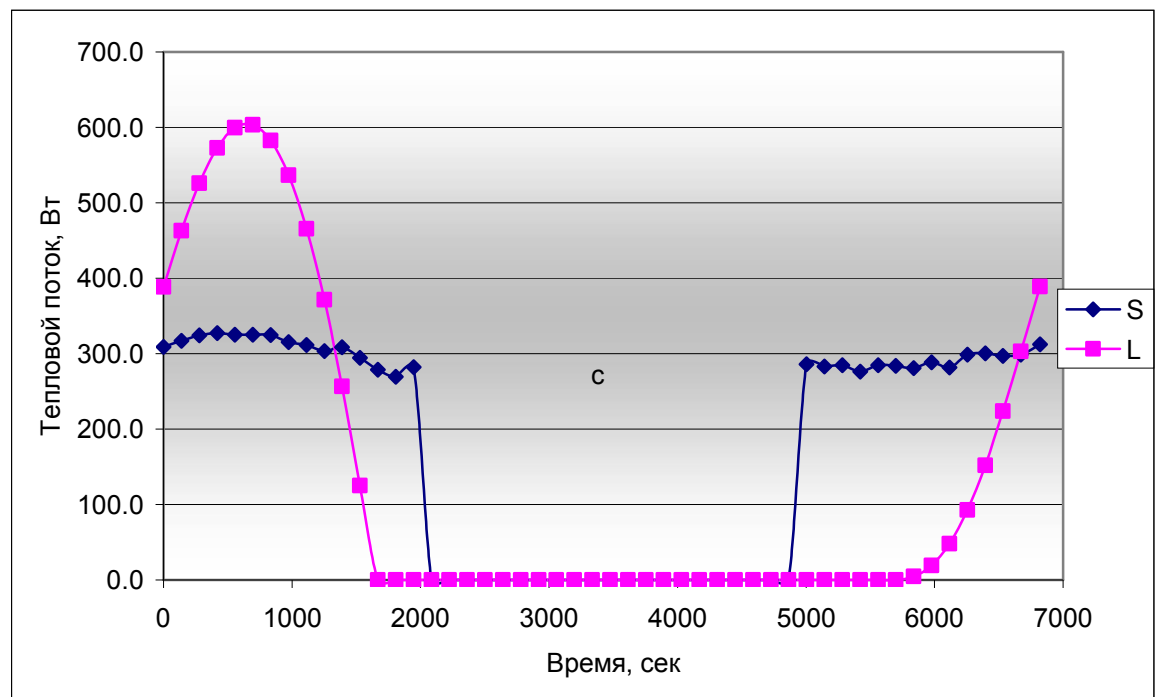


Рис. 4.2. Падающие на РТО солнечные и инфракрасные потоки на опорной орбите ИСЛ при наклоне плоскости РТО от Луны на 15°

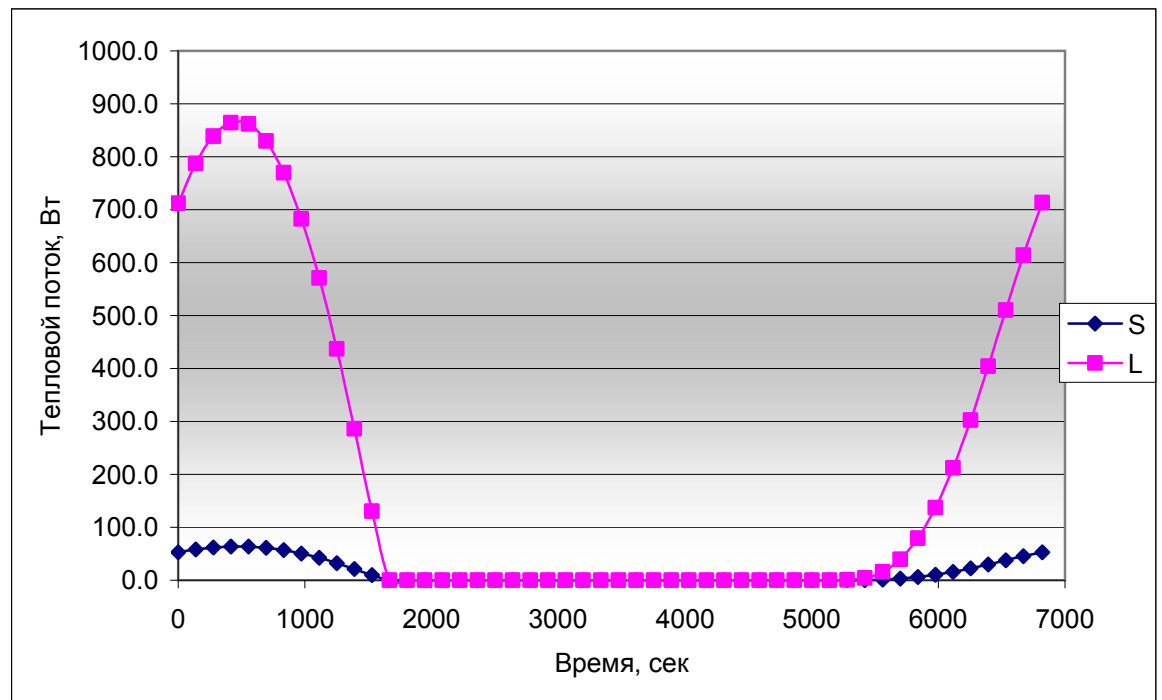


Рис. 4.3. Падающие на РТО солнечные и инфракрасные потоки на опорной орбите ИСЛ при наклоне плоскости РТО в сторону Луны на 15°

Приведенные рисунки соответствуют инерциальному движению КА, соответственно, с наклоном РТО в сторону Луны и от нее на 15 градусов. Отличие, которое можно видеть в полученных результатах, вполне логично, поскольку с уменьшением солнечных потоков (S) увеличиваются потоки от Луны (L) и наоборот. Режим нахождения КА на орбите ИСЛ, плоскость которой перпендикулярна плоскости терминатора, здесь рассматривается как наиболее теплонапряженный.

Внешние потоки, поступающие к РТО в процессе начального этапа посадки, т.е. при движении КА осью «X» против вектора скорости, показаны на рисунке 4.4. Как видно из рисунка, в данном случае (в лунный полдень), не избежать (практически, лобовой) засветки РТО, поскольку

ориентация КА по «SOX» на этапе торможения не регламентируется (со стороны СОТР).

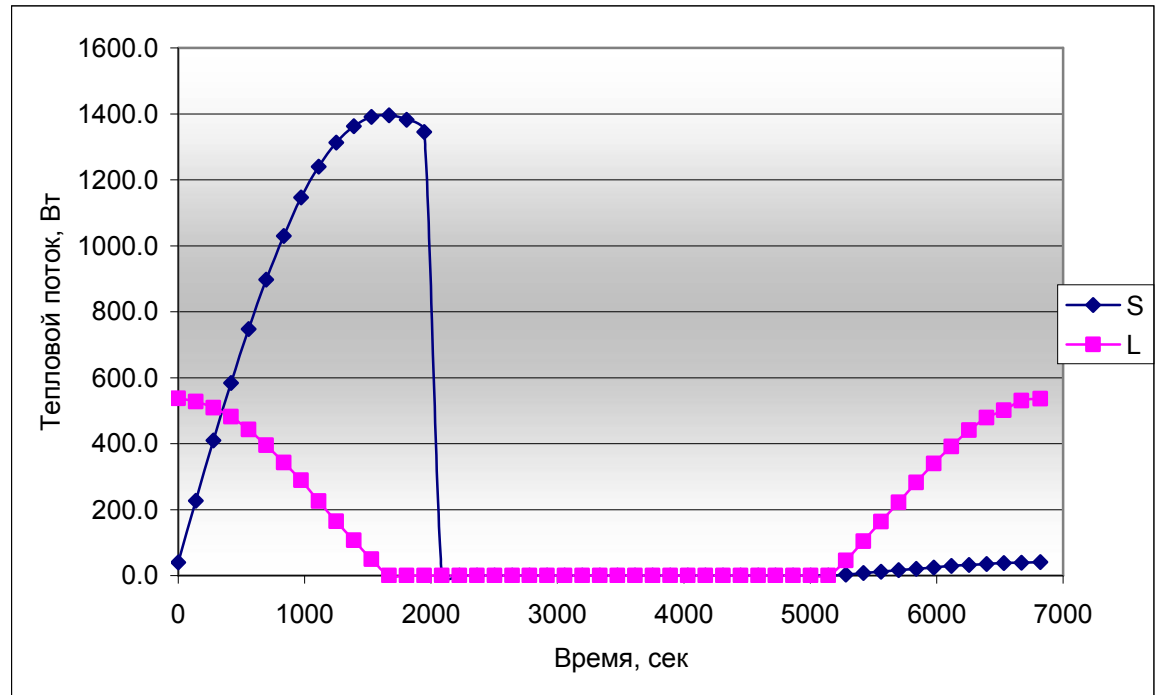


Рис.4.4. Падающие на РТО солнечные и инфракрасные потоки на посадочной орбите.

В случае осуществления посадки лунным утром - значение падающих потоков и от Солнца и от Луны будет в несколько раз меньше, «засветка» РТО будет кратковременной, кроме того на начало ресурса покрытие РТО будет иметь наименьшее значение A_s , поэтому, данный режим, не представляется экстремальным.

На качественном уровне условия функционирования КА на этапе перелета к Луне менее критичны по тепловому режиму, чем условия пребывания КА на окололунной орбите и на поверхности самой Луне.

Работа КА «Луна-Глоб» на поверхности Луны характеризуется напряженными температурными условиями. Это связано с тем, что продолжительность ночи и дня составляет на Луне по четырнадцать земных суток. Окружающая поверхность в зоне посадки КА ночью остывает до минус 210 °С, а днем прогревается до плюс 20 °С.

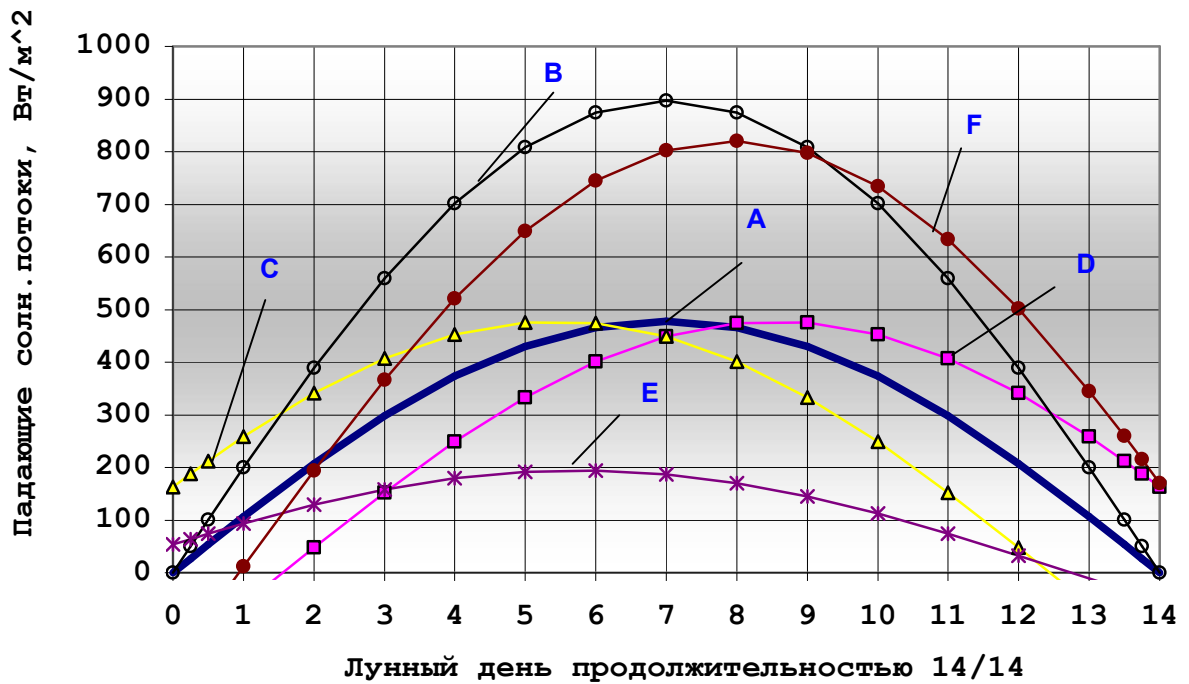
Посадочный модуль ориентирован в месте посадки так, чтобы сторона ТСП (размещенная по «+Y»), оснащенная научным оборудованием была ориентирована на Землю, а ось «+X» совпадала с местной вертикалью. В таком случае, при посадке КА на Южный полюс в сторону восходящего Солнца будет смотреть ось КА «-Z».

В идеальном случае, если КА сел на абсолютно плоскую местность, его собственная система координат должна привязаться к Луне следующим образом: ось «X» совпадает с местной вертикалью, ось «Y» является касательной к местному меридиану (смотрит на Экватор), ось «Z» - касательная к местной параллели (смотрит на Запад).

При посадке Продольная ось “X” может оказаться отклоненной от местной вертикали. Значение предельного угла наклона оси «X» КА по отношению к местной вертикали не должно превышать 20° . Это ограничение в первую очередь обусловлено необходимостью обеспечения работоспособности аксиальных тепловых труб, проложенных внутри ТПС. Величина производительности РТО, развиваемая в каждый момент лунного дня, будет зависеть не только от местной географической широты, но и от того в какую сторону наклонился посадочный модуль (в пределах 20 град) на Север, на Юг, на Запад или на Восток.

Если угол между осью «X» КА и местной вертикалью представить как совокупность (двух) наклонов КА, а именно, в сторону одного из полюсов и в сторону Запада или Востока, тогда можно наглядно проиллюстрировать характер изменения падающих солнечных потоков.

Рисунке 4.5, заимствованном из работы [8], представлены результаты расчета плотности падающего на РТО в течении лунного дня в точке с географической широтой 70 град. ю.ш. Но следует заметить, что плотность падающего потока для выбранной точки посадки (72.9 ю.ш.) приблизительно на 15 процентов меньше представленных ниже величин:



A – ось «X» совпадает с местной вертикалью

B – ось «X» наклонена на 20 град в сторону Экватора

C – ось «X» наклонена на 20 град в сторону Востока

D – ось «X» наклонена на 20 град в сторону Запада

E – ось «X» наклонена на 16 град в сторону Востока и 12 град в сторону Полюса (итого 20град).

F – ось «X» наклонена на 12 град в сторону Запада и 16 град в сторону Экватора (итого 20град).

Рис.4.5. Внешние потоки на рабочую поверхность РТО в зависимости от положения КА на поверхности Луны (70 град ю.ш.)

Из графиков мы можем видеть, что внешние потоки на РТО СОТР ТСП могут меняться в широких пределах, а это влияет на эффективность СОТР. Из полученных результатов следует, что наиболее предпочтительно наклонить аппарат осью «X» в сторону полюса, (после посадки), однако,

это потребует определенного усложнения конструкции КА имеющейся в заделе (от проекта «Луна-Ресурс»).

Сопоставляя все представленные в работе [37] результаты расчетов плотности падающих на РТО внешних тепловых потоков (главным образом от Солнца), можно констатировать, что наиболее жесткие внешние тепловые условия функционирования для РТО будут иметь место на поверхности Луны, особенно при наклоне продольной оси изделия на угол порядка 20° в направлении экватора. На других этапах функционирования, а именно: на опорной окололунной орбите и на посадочной орбите плотности падающих на РТО тепловых потоков по расчетам могут превышать максимальную плотность потоков, падающих на поверхности Луны. Но действие таких потоков кратковременно хотя они многократно повторяются .

4.2.5. Результаты решения задачи определения режимов работы имитатора.

В данном разделе в виде таблиц с соответствующими комментариями приводятся результаты расчета величин электрической мощности, подводимой к задействованным в работе модулям имитатора, и результаты расчета погрешностей воспроизведения заданных в [8] расчетных значений плотности потоков излучения, исходящих от Солнца и Луны и поглощаемых поверхностью РТО. При этом рассматривались самые теплонапряженные условия эксплуатации изделия на Луне и на окололунной орбите.

Энергетический режим работы ИКИ определялся с учетом необходимости моделирования внешних тепловых нагрузок и на остальные поверхности испытываемого объекта, хотя данные об этих нагрузках в отмеченной работе [8] отсутствуют. Но принимались во внимание следующие соображения: Большая часть поверхности объекта заэкранирована ЭВТИ. Наибольшие опасения вызывает ситуации, когда РТО подвергается повышенной внешней

тепловой нагрузке. В этом случае возможные утечки тепла из объекта через поверхность ЭВТИ могут несколько разгрузить СОТР КА. Поэтому во время тепловакуумных испытаний КА целесообразно на поверхности ЭВТИ создать условия, при которых будут отсутствовать утечки тепла и теплопритоки через тепловую изоляцию. С этой целью предполагалось, что заэкранированные ЭВТИ поверхности подвергаются воздействию потока излучения с плотностью $300 \frac{вт}{м^2}$, что обеспечивает практически нулевой результирующий тепловой поток через теплоизоляцию.

Определялся оптимальный режим работы ИКИ для двух наиболее теплонапряженных в отношении внешних тепловых воздействий на РТО ситуаций на орбите ИСЛ и на поверхности Луны. Имитировались поглощаемые поверхностью РТО внешние тепловые потоки в 6 характерных точках на орбите и во время пребывания КА на поверхности Луны. Результаты расчетов представлены в виде двух таблиц с соответствующими комментариями.

Таблица 6

ПРЕБЫВАНИЕ НА ПОВЕРХНОСТИ ЛУНЫ ПРИ НАКЛОНЕ ОСИ"Х" НА 20 град. В СТОРОНУ ЭКВАТОРА

tau=0.											
QW_RTO - расчетное значение плотности поглощаемого теплового потока, Вт/м ²											
488.00											
T_RTO при отсутствии внутреннего теплоподвода, °С											
41.48											
Относительные значения величин интенсивности излучения модулей имитатора, размещенных на боковой поверхности, по отношению к максимальной интенсивности излучения одного из модулей											
J-номер яруса											
J=1											
0.44	0.34	0.27	0.35	0.42	0.33	0.31	0.32	0.37	0.30	0.29	0.35
0.36	0.33	0.30	0.35	0.41	0.35	0.33	0.25	0.34	0.48	0.18	0.29
J=2											
0.03	0.17	0.07	0.06	0.11	0.10	0.08	0.09	0.16	0.13	0.09	0.09
0.14	0.12	0.07	0.07	0.11	0.09	0.07	0.13	0.16	0.05	0.11	0.19

J=3											
0.40	0.19	0.20	0.26	0.29	0.26	0.20	0.21	0.26	0.22	0.20	0.20
0.27	0.24	0.21	0.23	0.30	0.28	0.19	0.17	0.28	0.25	0.22	0.08
J=4											
0.00	0.18	0.08	0.03	0.10	0.10	0.07	0.11	0.17	0.13	0.10	0.09
0.17	0.10	0.06	0.07	0.10	0.06	0.08	0.14	0.17	0.06	0.10	0.24
J=5											
0.58	0.25	0.33	0.32	0.44	0.38	0.30	0.27	0.37	0.32	0.30	0.26
0.39	0.34	0.31	0.31	0.45	0.39	0.29	0.22	0.37	0.41	0.29	0.09
Торцевые модули											
0.00	0.00										
1.00	1.00										
Величины электрических мощностей, подводимых к модулям боковой поверхности имитатора, [Вт].											
J=1											
335	255	206	268	318	251	233	244	284	226	223	264
273	252	224	264	310	268	248	192	258	364	138	217
J=2											
24	126	53	47	80	79	59	70	118	98	70	68
108	90	55	52	84	68	51	102	122	40	85	142
J=3											
305	142	154	197	222	199	153	157	197	166	150	154
207	180	159	178	230	216	145	129	215	187	169	58
J=4											
1	133	60	24	78	72	54	80	126	96	76	71
130	75	46	54	78	47	61	106	129	44	74	179
J=5											
440	192	251	247	332	287	226	207	278	243	230	198
293	259	236	238	343	297	222	171	279	313	223	72
торцевые модули; 2-нижних, 2 верхних											
0	0										
1520	1519										
Относительные погрешности воспроизведения заданных расчетных тепловых нагрузок в верхней плоскости – плоскости РТО											
0.0264	0.0233	0.0131	-0.0055	-0.0331	-0.0687	0.0688	-0.0687	-0.0332	-0.0055	0.0130	0.0232
0.0263	0.0232	0.0130	-0.0056	-0.0332	-0.0687	0.0682	-0.0691	-0.0335	-0.0058	0.0129	0.0232
0.0333	0.0333	0.0311	0.0196	-0.0099	-0.0589	0.0447	-0.0589	-0.0099	0.0195	0.0310	0.0332
0.0331	0.0332	0.0310	0.0195	-0.0100	-0.0590	0.0438	-0.0596	-0.0104	0.0193	0.0311	0.0333
0.0319	0.0320	0.0260	0.0022	-0.0132	-0.0628	0.0094	-0.0628	-0.0133	0.0021	0.0259	0.0319
0.0318	0.0319	0.0259	0.0021	-0.0133	-0.0629	0.0083	-0.0636	-0.0136	0.0021	0.0258	0.0320
-0.0386	-0.0301	-0.0127	-0.0126	-0.0420	-0.0806	-0.0334	-0.0804	-0.0421	-0.0129	-0.0128	-0.0300
-0.0387	-0.0300	-0.0128	-0.0128	-0.0422	-0.0807	-0.0345	-0.0812	-0.0423	-0.0132	-0.0126	-0.0296
Среднеинтегральная и среднеквадратичная по поверхности РТО погрешности воспроизведения требуемой нагрузки.											
-0.0001	0.0078										
tau=400 с.											
QW_RTO - расчетное значение плотности поглощаемого теплового потока, Вт/м ²											
560.00											
T_RTO при отсутствии внутреннего теплоподвода, °C											
52.48											

Относительные значения величин интенсивности излучения модулей имитатора, размещенных на боковой поверхности, по отношению к максимальной интенсивности излучения одного из модулей											
J-номер яруса											
0.41	0.31	0.24	0.33	0.39	0.30	0.26	0.29	0.35	0.30	0.25	0.30
0.32	0.33	0.27	0.30	0.37	0.34	0.30	0.23	0.30	0.43	0.19	0.23
J=2											
0.00	0.13	0.05	0.02	0.07	0.08	0.06	0.06	0.11	0.10	0.07	0.07
0.10	0.08	0.04	0.04	0.08	0.06	0.03	0.09	0.13	0.04	0.07	0.15
J=3											
0.34	0.18	0.19	0.23	0.26	0.25	0.18	0.18	0.23	0.21	0.18	0.17
0.23	0.23	0.20	0.20	0.25	0.27	0.19	0.15	0.23	0.23	0.22	0.06
J=4											
0.00	0.14	0.05	0.01	0.07	0.07	0.06	0.08	0.12	0.10	0.08	0.07
0.14	0.08	0.03	0.05	0.08	0.04	0.05	0.10	0.15	0.06	0.05	0.20
J=5											
0.43	0.27	0.31	0.28	0.36	0.35	0.28	0.22	0.30	0.30	0.27	0.22
0.30	0.32	0.30	0.27	0.37	0.35	0.30	0.20	0.27	0.37	0.30	0.09
Торцевые модули											
0.00	0.00										
1.00	1.00										
Величины электрических мощностей, подводимых к модулям боковой поверхности имитатора, [Вт].											
J=1											
368	273	211	289	349	269	235	254	309	264	220	264
286	295	242	264	325	302	267	203	262	385	170	204
J=2											
3	115	46	18	58	71	52	53	94	87	62	60
91	74	38	35	68	56	30	84	116	31	63	137
J=3											
300	162	171	203	229	218	162	158	205	185	157	150
206	203	179	182	226	236	171	129	204	204	192	55
J=4											
2	120	46	11	63	62	53	71	110	93	73	67
120	69	29	40	70	38	46	92	130	51	48	178
J=5											
381	240	275	251	319	312	250	197	269	268	243	194
271	286	267	239	330	310	263	175	242	325	264	81
торцевые модули; 2-нижних, 2 верхних											
0	0										
1777	1777										
Относительные погрешности воспроизведения заданных расчетных тепловых нагрузок в верхней плоскости – плоскости РТО											
0.0303	0.0266	0.0147	-0.0070	-0.0394	-0.0809	0.0799	-0.0810	-0.0395	-0.0071	0.0146	0.0265
0.0302	0.0265	0.0146	-0.0071	-0.0395	-0.0810	0.0792	-0.0815	-0.0398	-0.0073	0.0145	0.0265
0.0379	0.0380	0.0355	0.0220	-0.0125	-0.0698	0.0513	-0.0699	-0.0126	0.0218	0.0354	0.0379
0.0378	0.0379	0.0353	0.0218	-0.0126	-0.0699	0.0503	-0.0706	-0.0131	0.0216	0.0354	0.0380
0.0358	0.0359	0.0289	0.0011	-0.0169	-0.0749	0.0095	-0.0750	-0.0170	0.0010	0.0288	0.0358
0.0357	0.0358	0.0288	0.0010	-0.0171	-0.0751	0.0082	-0.0759	-0.0174	0.0010	0.0287	0.0359
-0.0474	-0.0374	-0.0171	-0.0171	-0.0514	-0.0964	-0.0413	-0.0964	-0.0515	-0.0173	-0.0172	-0.0373
-0.0475	-0.0374	-0.0172	-0.0173	-0.0516	-0.0966	-0.0426	-0.0972	-0.0517	-0.0176	-0.0170	-0.0369
Среднеинтегральная и среднеквадратичная по поверхности РТО погрешности											

воспроизведения требуемой нагрузки.											
-0.001	0.0098										
tau=800 с.											
QW_RTO - расчетное значение плотности поглощаемого теплового потока, Вт/м ²											
508.00											
T_RTO при отсутствии внутреннего теплоподвода, °C											
44.65											
Относительные значения величин интенсивности излучения модулей имитатора, размещенных на боковой поверхности, по отношению к максимальной интенсивности излучения одного из модулей											
J-номер яруса											
J=1											
0.39	0.36	0.25	0.34	0.42	0.33	0.28	0.30	0.37	0.33	0.26	0.31
0.34	0.37	0.29	0.31	0.39	0.37	0.33	0.24	0.30	0.46	0.22	0.27
J=2											
0.06	0.14	0.08	0.04	0.08	0.10	0.08	0.08	0.13	0.12	0.09	0.09
0.12	0.11	0.06	0.06	0.10	0.09	0.05	0.11	0.16	0.07	0.09	0.15
J=3											
0.33	0.21	0.21	0.24	0.27	0.27	0.20	0.19	0.25	0.23	0.19	0.18
0.25	0.25	0.22	0.22	0.27	0.29	0.22	0.15	0.23	0.24	0.24	0.08
J=4											
0.03	0.15	0.07	0.03	0.09	0.09	0.08	0.09	0.14	0.13	0.10	0.09
0.15	0.10	0.05	0.06	0.10	0.06	0.06	0.12	0.17	0.08	0.06	0.21
J=5											
0.44	0.31	0.34	0.30	0.38	0.39	0.31	0.24	0.33	0.34	0.30	0.24
0.33	0.36	0.33	0.29	0.40	0.39	0.34	0.22	0.28	0.40	0.34	0.12
Торцевые модули											
0.00	0.00										
1.00	1.00										
Величины электрических мощностей, подводимых к модулям боковой поверхности имитатора, [Вт].											
J=1											
314	284	202	267	334	264	223	238	295	262	206	247
272	291	231	246	307	298	263	192	236	266	172	216
J=2											
44	110	61	32	67	83	65	62	100	99	74	70
99	87	51	45	77	68	39	91	129	53	69	120
J=3											
266	168	168	190	217	215	157	149	196	183	153	142
195	200	174	172	213	233	172	122	187	194	194	65
J=4											
26	121	53	23	70	70	62	74	112	100	79	71
123	80	38	46	77	47	50	94	139	68	46	167
J=5											
347	245	273	242	304	308	248	193	262	267	239	193
259	284	264	230	315	307	268	173	223	315	272	95
торцевые модули; 2-нижних, 2 верхних											
0	0	1591	1591								
Относительные погрешности воспроизведения заданных расчетных тепловых нагрузок в											

верхней плоскости-плоскости РТО											
0.0275	0.0242	0.0136	-0.0059	-0.0349	-0.0721	0.0719	-0.0721	-0.0349	-0.0060	0.0135	0.0241
0.0274	0.0241	0.0135	-0.0060	-0.0350	-0.0721	0.0713	-0.0726	-0.0353	-0.0062	0.0134	0.0241
0.0345	0.0346	0.0323	0.0202	-0.0106	-0.0619	0.0465	-0.0620	-0.0107	0.0201	0.0322	0.0345
0.0344	0.0345	0.0322	0.0201	-0.0107	-0.0620	0.0456	-0.0626	-0.0111	0.0200	0.0322	0.0346
0.0330	0.0330	0.0268	0.0019	-0.0142	-0.0662	0.0094	-0.0662	-0.0143	0.0018	0.0267	0.0330
0.0328	0.0329	0.0267	0.0018	-0.0144	-0.0663	0.0083	-0.0670	-0.0146	0.0018	0.0266	0.0330
-0.0411	-0.0321	-0.0140	-0.0139	-0.0446	-0.0849	-0.0356	-0.0849	-0.0447	-0.0141	-0.0141	-0.0320
-0.0412	-0.0322	-0.0141	-0.0141	-0.0448	-0.0851	-0.0367	-0.0856	-0.0448	-0.0144	-0.0139	-0.0318
Среднеинтегральная и среднеквадратичная по поверхности РТО погрешности воспроизведения требуемой нагрузки											
-0.0001	0.0084										
tau=1200 с.											
QW_RTO - расчетное значение плотности поглощаемого теплового потока, Вт/м ²											
436.00											
T_RTO при отсутствии внутреннего теплоподвода, °C											
32.74											
Относительные значения величин интенсивности излучения модулей имитатора, размещенных на боковой поверхности, по отношению к максимальной интенсивности излучения одного из модулей											
J-номер яруса											
J=1											
0.37	0.45	0.28	0.35	0.47	0.39	0.31	0.32	0.41	0.39	0.29	0.34
0.38	0.42	0.32	0.33	0.41	0.42	0.39	0.28	0.31	0.51	0.25	0.34
J=2											
0.14	0.15	0.13	0.08	0.12	0.15	0.13	0.11	0.16	0.17	0.13	0.12
0.16	0.15	0.11	0.10	0.14	0.14	0.08	0.14	0.21	0.12	0.13	0.15
J=3											
0.34	0.26	0.24	0.26	0.30	0.31	0.23	0.21	0.28	0.27	0.23	0.20
0.28	0.29	0.25	0.23	0.28	0.33	0.26	0.18	0.26	0.27	0.29	0.12
J=4											
0.08	0.18	0.10	0.06	0.12	0.12	0.11	0.12	0.17	0.16	0.13	0.11
0.18	0.14	0.08	0.09	0.14	0.10	0.09	0.13	0.21	0.14	0.08	0.23
J=5											
0.46	0.38	0.40	0.34	0.43	0.45	0.37	0.28	0.38	0.40	0.35	0.29
0.37	0.42	0.39	0.32	0.43	0.44	0.41	0.27	0.31	0.45	0.41	0.17
Торцевые модули											
0.00	0.00										
1.00	1.00										
Величины электрических мощностей, подводимых к модулям боковой поверхности имитатора, [Вт].											
J=1											
245	298	189	233	310	259	208	215	276	261	192	225
254	283	217	219	274	281	258	188	210	337	168	230
J=2											
96	102	85	54	79	99	84	74	106	114	90	80
106	103	72	64	95	91	53	92	137	82	88	99
J=3											
225	175	161	171	200	209	152	140	186	180	150	133
183	196	167	156	189	222	173	122	172	180	192	79

1.00	1.00										
Величины электрических мощностей, подводимых к модулям боковой поверхности имитатора, [Вт].											
J=1											
183	311	177	196	281	252	195	195	256	261	182	206
234	273	202	196	241	259	249	185	189	311	166	242
J=2											
144	93	114	81	94	118	105	88	110	126	105	91
115	119	95	86	114	115	72	97	141	106	108	78
J=3											
180	182	149	146	176	196	143	129	174	176	148	124
169	185	156	139	162	201	167	121	159	163	187	97
J=4											
91	120	89	67	97	100	96	88	111	118	103	81
124	109	79	78	109	95	76	86	142	116	64	131
J=5											
260	254	251	205	256	282	234	182	245	259	229	191
231	268	251	197	253	269	261	191	192	273	272	142
торцевые модули; 2-нижних, 2 верхних											
99	99										
659	659										
Относительные погрешности воспроизведения заданных расчетных тепловых нагрузок в верхней плоскости – плоскости РТО											
0.0124	0.0108	0.0058	-0.0035	-0.0173	-0.0350	0.0335	-0.0350	-0.0173	-0.0035	0.0057	0.0108
0.0124	0.0108	0.0057	-0.0035	-0.0173	-0.0350	0.0332	-0.0352	-0.0175	-0.0036	0.0057	0.0108
0.0168	0.0169	0.0158	0.0100	-0.0047	-0.0291	0.0225	-0.0291	-0.0047	0.0100	0.0157	0.0168
0.0168	0.0168	0.0157	0.0099	-0.0047	-0.0292	0.0221	-0.0294	-0.0049	0.0099	0.0157	0.0169
0.0178	0.0178	0.0148	0.0030	-0.0047	-0.0294	0.0065	-0.0294	-0.0047	0.0029	0.0148	0.0178
0.0177	0.0178	0.0148	0.0029	-0.0048	-0.0295	0.0060	-0.0298	-0.0049	0.0030	0.0147	0.0178
-0.0150	-0.0107	-0.0022	-0.0021	-0.0167	-0.0360	-0.0125	-0.0359	-0.0167	-0.0022	-0.0021	-0.0106
-0.0150	-0.0108	-0.0022	-0.0022	-0.0168	-0.0361	-0.0131	-0.0362	-0.0167	-0.0023	-0.0021	-0.0106
Среднеинтегральная и среднеквадратичная по поверхности РТО погрешности воспроизведения требуемой нагрузки.											
-0.0001	0.0036										
tau=2000 с.											
Расчетное значение плотности поглощаемого теплового потока, Вт/м ²											
270.00											
T_РТО при отсутствии внутреннего теплоподвода, °С											
-1.78											
Относительные значения величин интенсивности излучения модулей имитатора, размещенных на боковой поверхности, по отношению к максимальной интенсивности излучения одного из модулей											
J-номер яруса											
J=1											
0.59	1.00	0.57	0.62	0.90	0.81	0.62	0.62	0.82	0.84	0.59	0.66
0.75	0.88	0.65	0.63	0.76	0.82	0.80	0.60	0.61	1.00	0.53	0.78

J=2											
0.46	0.30	0.37	0.26	0.30	0.38	0.34	0.29	0.35	0.40	0.34	0.29
0.37	0.38	0.31	0.28	0.37	0.38	0.24	0.31	0.45	0.34	0.35	0.25
J=3											
0.57	0.58	0.48	0.47	0.56	0.63	0.46	0.41	0.55	0.56	0.47	0.40
0.54	0.59	0.50	0.44	0.51	0.64	0.53	0.39	0.51	0.52	0.60	0.31
J=4											
0.30	0.38	0.29	0.22	0.31	0.33	0.31	0.29	0.36	0.38	0.34	0.26
0.40	0.35	0.26	0.25	0.35	0.31	0.25	0.27	0.45	0.37	0.21	0.42
J=5											
0.83	0.82	0.80	0.65	0.82	0.90	0.75	0.58	0.78	0.83	0.73	0.61
0.74	0.86	0.81	0.63	0.80	0.85	0.85	0.62	0.62	0.87	0.87	0.46
Торцевые модули											
0.17	0.17										
0.98	0.98										
Величины электрических мощностей, подводимых к модулям боковой поверхности имитатора, [Вт].											
J=1											
183	311	177	194	279	252	194	193	255	261	182	206
233	273	203	195	238	256	248	186	190	311	166	242
J=2											
144	93	116	82	95	119	106	89	110	126	106	92
114	119	95	87	115	118	74	97	140	106	109	78
J=3											
178	182	148	145	174	196	142	128	173	175	148	123
169	185	156	138	160	199	166	121	159	162	186	97
J=4											
92	119	91	68	98	101	98	89	111	119	104	81
123	109	80	79	110	98	79	86	141	117	65	130
J=5											
258	255	250	204	254	281	233	181	244	258	229	191
230	268	251	196	250	266	266	192	192	272	272	144
торцевые модули; 2-нижних, 2 верхних											
108	108										
612	612										
Относительные погрешности воспроизведения заданных расчетных тепловых нагрузок в верхней плоскости – плоскости РТО											
0.0116	0.0101	0.0053	-0.0035	-0.0166	-0.0334	0.0317	-0.0335	-0.0167	-0.0035	0.0053	0.0101
0.0116	0.0101	0.0052	-0.0036	-0.0167	-0.0335	0.0314	-0.0337	-0.0168	-0.0036	0.0052	0.0101
0.0159	0.0160	0.0149	0.0094	-0.0045	-0.0277	-0.0213	0.0278	-0.0046	0.0094	0.0149	0.0159
0.0159	0.0159	0.0148	0.0094	-0.0046	-0.0278	0.0209	-0.0281	-0.0048	0.0093	0.0149	0.0159
0.0170	0.0170	0.0142	0.0029	-0.0044	-0.0279	0.0063	-0.0279	-0.0044	0.0029	0.0141	0.0170
0.0169	0.0170	0.0141	0.0028	-0.0045	-0.0280	0.0057	-0.0283	-0.0046	0.0029	0.0141	0.0170
-0.0139	-0.0099	-0.0017	-0.0017	-0.0156	-0.0339	-0.0115	-0.0338	-0.0156	-0.0018	-0.0017	-0.0098
-0.0140	-0.0099	-0.0018	-0.0018	-0.0157	-0.0340	-0.0122	-0.0342	-0.0156	-0.0019	-0.0017	-0.0097

Среднеинтегральная и среднеквадратичная по поверхности РТО погрешности воспроизведения требуемой нагрузки.

-0.0001	0.0034										
---------	--------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Таблица 7

ПОСАДОЧНАЯ ОРБИТА

tau=0.											
Расчетное значение плотности поглощаемого теплового потока, Вт/м ²											
486.00											
Относительные значения величин интенсивности излучения модулей имитатора, размещенных на боковой поверхности, по отношению к максимальной интенсивности излучения одного из модулей											
J-номер яруса											
J=1											
0.36	0.25	0.23	0.28	0.31	0.27	0.24	0.28	0.31	0.25	0.26	0.29
0.27	0.28	0.26	0.26	0.30	0.26	0.27	0.27	0.27	0.30	0.25	0.22
J=2											
0.03	0.09	0.04	0.07	0.10	0.06	0.03	0.08	0.10	0.04	0.04	0.10
0.08	0.06	0.04	0.07	0.12	0.06	0.01	0.09	0.11	0.04	0.01	0.14
J=3											
0.32	0.15	0.14	0.24	0.22	0.18	0.16	0.20	0.23	0.17	0.17	0.22
0.20	0.19	0.18	0.20	0.21	0.19	0.19	0.20	0.19	0.23	0.18	0.13
J=4											
0.12	0.07	0.01	0.09	0.09	0.05	0.04	0.08	0.10	0.03	0.05	0.11
0.07	0.04	0.06	0.07	0.11	0.05	0.03	0.09	0.09	0.07	0.05	0.03
J=5											
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.04	0.01	0.00	0.01
0.05	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14
J=6											
0.96	1.00	0.95	0.90	0.99	1.00	0.88	0.89	0.95	0.82	0.95	1.00
0.76	0.85	1.00	1.00	0.95	0.81	0.96	1.00	1.00	1.00	0.83	0.56
Торцевые модули											
0	0	0	0	0							
0	0	0	0	0							
Величины электрических мощностей, подводимых к модулям боковой поверхности имитатора, [Вт].											
J=1											
171	120	109	135	145	128	112	132	148	119	121	136
130	134	123	125	141	124	128	127	129	143	121	106
J=2											
14	42	21	31	46	28	17	38	50	20	1	46
39	28	19	31	57	26	5	45	53	19	6	68
J=3											
151	72	66	112	103	87	78	97	111	82	81	103
97	90	86	95	98	88	89	95	90	109	84	62

J=4											
56	34	6	43	44	26	20	38	49	14	22	53
32	20	27	35	52	24	15	41	41	32	22	15
J=5											
0	0	0	0	0	0	0	2	19	4	0	3
24	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	66
J=6											
457	47	4449	426	472	475	420	422	451	390	454	475
361	405	475	475	450	384	458	475	475	473	393	267
торцевые модули; 5-нижних, 5 верхних											
0	0	0	0	0							
0	0	0	0	0							
Относительные погрешности моделирования поглощаемого элементами РТО потока излучения, исходящего от Солнца и Луны на посадочной орбите. В верхней плоскости-плоскости РТО											
0.0050	0.0049	0.0053	0.0050	0.0052	0.0046	0.0048	0.0042	0.0045	0.0040	0.0043	0.0039
0.0043	0.0039	0.0044	0.0041	0.0045	0.0042	0.0046	0.0043	0.0046	0.0043	0.0048	0.0047
0.0051	0.0049	0.0053	0.0050	0.0054	0.0050	0.0052	0.0047	0.0049	0.0043	0.0046	0.0042
0.0045	0.0042	0.0047	0.0044	0.0047	0.0042	0.0045	0.0040	0.0044	0.0040	0.0046	0.0044
0.0151	0.0147	0.0156	0.0150	0.0153	0.0142	0.0147	0.0137	0.0144	0.0137	0.0145	0.0138
0.0146	0.0138	0.0147	0.0141	0.0150	0.0143	0.0150	0.0141	0.0148	0.0139	0.0149	0.0144
0.0153	0.0145	0.0154	0.0147	0.0156	0.0150	0.0156	0.0146	0.0151	0.0140	0.0147	0.0138
0.0148	0.0142	0.0153	0.0147	0.0153	0.0143	0.0148	0.0137	0.0144	0.0135	0.0145	0.0140
-0.0027	-0.0034	-0.0021	-0.0032	-0.0026	-0.0045	-0.0034	-0.0048	-0.0032	-0.0042	-0.0026	-0.0036
-0.0023	-0.0038	-0.0023	-0.0036	-0.0021	-0.0033	-0.0023	-0.0038	-0.0029	-0.0044	-0.0028	-0.0038
-0.0026	-0.0039	-0.0026	-0.0038	-0.0021	-0.0030	-0.0018	-0.0033	-0.0025	-0.0043	-0.0031	-0.0044
-0.0028	-0.0037	-0.0018	-0.0027	-0.0016	-0.0032	-0.0023	-0.0040	-0.0030	-0.0046	-0.0032	-0.0044
-0.0578	-0.0592	-0.0573	-0.0590	-0.0578	-0.0605	-0.0586	-0.0605	-0.0578	-0.0591	-0.0564	-0.0580
-0.0560	-0.0584	-0.0564	-0.0586	-0.0564	-0.0584	-0.0568	-0.0592	-0.0578	-0.0603	-0.0577	-0.0592
-0.0575	-0.0598	-0.0579	-0.0598	-0.0570	-0.0583	-0.0564	-0.0586	-0.0573	-0.0600	-0.0580	-0.0600
-0.0576	-0.0592	-0.0564	-0.0578	-0.0560	-0.0582	-0.0563	-0.0586	-0.0568	-0.0594	-0.0577	-0.0601
Среднеинтегральная и среднеквадратичная по поверхности РТО погрешности воспроизведения требуемой нагрузки.											
0	0.0159										
tau=400 с.											
QW_RTO - расчетное значение плотности поглощаемого теплового потока, Вт/м ²											
516.00											
Относительные значения величин интенсивности излучения модулей имитатора, размещенных на боковой поверхности, по отношению к максимальной интенсивности излучения одного из модулей											
J-номер яруса											
0.36	0.25	0.25	0.29	0.30	0.27	0.25	0.28	0.31	0.26	0.25	0.29
0.29	0.27	0.26	0.28	0.29	0.26	0.27	0.27	0.28	0.29	0.27	0.23
J=2											
0.01	0.09	0.04	0.05	0.10	0.06	0.03	0.07	0.09	0.05	0.03	0.07
0.09	0.06	0.04	0.06	0.10	0.06	0.01	0.08	0.11	0.03	0.01	0.14
J=3											
0.30	0.16	0.16	0.23	0.22	0.19	0.18	0.20	0.23	0.19	0.17	0.22
0.23	0.19	0.18	0.22	0.22	0.19	0.19	0.20	0.20	0.22	0.19	0.14
J=4											
0.06	0.08	0.02	0.06	0.09	0.05	0.03	0.06	0.10	0.04	0.02	0.08
0.08	0.04	0.03	0.06	0.10	0.04	0.02	0.08	0.08	0.04	0.04	0.07
J=5											

tau=800 с.											
QW _{RTO} - расчетное значение плотности поглощаемого теплового потока, Вт/м ²											
508.00											
Относительные значения величин интенсивности излучения модулей имитатора, размещенных на боковой поверхности, по отношению к максимальной интенсивности излучения одного из модулей											
J-номер яруса											
J=1											
0.35	0.25	0.25	0.29	0.29	0.27	0.25	0.28	0.30	0.27	0.25	0.28
0.29	0.27	0.25	0.29	0.29	0.26	0.27	0.28	0.28	0.29	0.27	0.23
J=2											
0.02	0.09	0.04	0.05	0.10	0.06	0.03	0.07	0.09	0.06	0.03	0.07
0.09	0.06	0.04	0.06	0.10	0.07	0.01	0.07	0.11	0.04	0.01	0.13
J=3											
0.29	0.17	0.16	0.22	0.22	0.19	0.18	0.20	0.23	0.19	0.16	0.21
0.23	0.19	0.17	0.22	0.22	0.19	0.19	0.20	0.20	0.21	0.19	0.15
J=4											
0.06	0.08	0.03	0.06	0.09	0.05	0.03	0.06	0.10	0.05	0.02	0.08
0.09	0.05	0.03	0.06	0.10	0.05	0.02	0.08	0.09	0.04	0.04	0.07
J=5											
0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00
0.02	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
J=6											
0.87	0.98	0.98	0.97	1.00	0.97	0.93	0.97	0.99	0.96	0.93	0.97
1.00	0.93	0.92	0.99	0.99	0.97	0.92	0.96	1.00	0.98	0.98	1.00
Торцевые модули											
0	0	0	0	0							
0	0	0	0	0							
Величины электрических мощностей, подводимых к модулям боковой поверхности имитатора, [Вт].											
J=1											
166	117	120	136	139	130	119	133	143	126	121	134
140	127	121	136	138	124	129	131	132	136	130	109
J=2											
10	44	18	25	48	27	16	33	44	27	16	33
42	28	19	26	46	33	7	34	54	19	6	63
J=3											
136	79	78	107	102	92	84	95	110	92	78	101
109	88	81	104	102	89	90	97	96	102	91	71
J=4											
30	36	12	29	44	26	15	28	47	24	9	37
41	24	16	27	48	23	11	38	41	21	19	35
J=5											
12	1	2	0	3	1	1	5	2	4	2	1
8	5	2	3	4	7	2	0	3	1	0	2
J=6											
415	466	464	459	475	459	442	463	471	458	444	462
475	441	438	471	470	460	435	458	475	464	464	475
торцевые модули; 5-нижних, 5 верхних											
0	0	0	0	0							

0	0	0	0	0							
Относительные погрешности моделирования поглощаемого элементами РТО потока излучения, исходящего от Солнца и Луны на посадочной орбите. В верхней плоскости-плоскости РТО											
0.0040	0.0037	0.0040	0.0037	0.0042	0.0038	0.0042	0.0038	0.0041	0.0037	0.0041	0.0036
0.0040	0.0036	0.0040	0.0037	0.0041	0.0038	0.0041	0.0036	0.0040	0.0035	0.0039	0.0036
0.0040	0.0037	0.0040	0.0036	0.0040	0.0036	0.0040	0.0037	0.0041	0.0037	0.0040	0.0035
0.0039	0.0035	0.0039	0.0036	0.0040	0.0037	0.0040	0.0036	0.0039	0.0035	0.0039	0.0036
0.0141	0.0134	0.0142	0.0135	0.0144	0.0137	0.0144	0.0136	0.0143	0.0135	0.0142	0.0134
0.0141	0.0133	0.0142	0.0135	0.0144	0.0137	0.0144	0.0134	0.0141	0.0132	0.0141	0.0134
0.0142	0.0135	0.0142	0.0133	0.0141	0.0133	0.0142	0.0135	0.0143	0.0135	0.0141	0.0132
0.0139	0.0131	0.0140	0.0133	0.0143	0.0136	0.0143	0.0134	0.0141	0.0132	0.0140	0.0133
-0.0049	-0.0062	-0.0049	-0.0062	-0.0047	-0.0059	-0.0047	-0.0061	-0.0048	-0.0062	-0.0049	-0.0063
-0.0050	-0.0064	-0.0049	-0.0060	-0.0045	-0.0057	-0.0046	-0.0061	-0.0049	-0.0064	-0.0050	-0.0062
-0.0047	-0.0060	-0.0048	-0.0063	-0.0051	-0.0065	-0.0049	-0.0061	-0.0047	-0.0060	-0.0049	-0.0065
-0.0052	-0.0067	-0.0051	-0.0063	-0.0046	-0.0058	-0.0046	-0.0062	-0.0050	-0.0065	-0.0050	-0.0063
-0.0630	-0.0650	-0.0632	-0.0652	-0.0629	-0.0648	-0.0630	-0.0653	-0.0633	-0.0653	-0.0631	-0.0651
-0.0631	-0.0654	-0.0630	-0.0649	-0.0626	-0.0646	-0.0627	-0.0650	-0.0631	-0.0653	-0.0631	-0.0651
-0.0628	-0.0648	-0.0629	-0.0652	-0.0633	-0.0655	-0.0631	-0.0649	-0.0628	-0.0649	-0.0631	-0.0654
-0.0633	-0.0655	-0.0632	-0.0651	-0.0628	-0.0647	-0.0628	-0.0652	-0.0632	-0.0654	-0.0631	-0.0651
Среднеинтегральная и среднеквадратичная по поверхности РТО погрешности воспроизведения требуемой нагрузки											
0	0.0179										
tau=1200 с.											
QW_RTO - расчетное значение плотности поглощаемого теплового потока, Вт/м ²											
418.40											
Относительные значения величин интенсивности излучения модулей имитатора, размещенных на боковой поверхности, по отношению к максимальной интенсивности излучения одного из модулей											
J-номер яруса											
J=1											
0.30	0.26	0.24	0.28	0.29	0.27	0.24	0.27	0.29	0.25	0.24	0.28
0.29	0.26	0.24	0.28	0.29	0.25	0.26	0.28	0.27	0.27	0.26	0.26
J=2											
0.11	0.07	0.06	0.07	0.12	0.07	0.05	0.09	0.11	0.08	0.05	0.08
0.10	0.08	0.06	0.07	0.11	0.10	0.04	0.08	0.12	0.07	0.04	0.10
J=3											
0.20	0.20	0.14	0.20	0.21	0.18	0.16	0.18	0.21	0.18	0.14	0.19
0.22	0.18	0.14	0.20	0.21	0.17	0.17	0.19	0.19	0.18	0.16	0.18
J=4											
0.15	0.06	0.05	0.11	0.12	0.08	0.06	0.09	0.13	0.09	0.05	0.10
0.12	0.09	0.07	0.08	0.13	0.08	0.06	0.10	0.11	0.09	0.08	0.07
J=5											
0.04	0.12	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02
0.03	0.04	0.03	0.01	0.01	0.05	0.05	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01
J=6											
0.60	0.42	0.77	0.80	0.94	0.87	0.70	0.76	0.83	0.80	0.76	0.74
0.81	0.78	0.70	0.76	0.83	0.80	0.71	0.71	0.83	0.87	0.87	1.00
Торцевые модули											
0	0	0	0	0							
0	0	0	0	0							
Величины электрических мощностей, подводимых к модулям боковой											

поверхности имитатора, [Вт].											
J=1											
140	125	114	130	134	125	113	128	139	120	115	131
136	122	114	133	135	116	123	131	127	125	123	121
J=2											
50	33	28	35	57	33	23	42	51	36	25	39
49	37	30	32	51	45	18	36	58	35	19	46
J=3											
96	93	65	93	98	84	73	86	101	86	68	89
104	83	68	94	97	80	79	91	91	85	78	87
J=4											
71	30	26	51	59	37	28	44	63	43	25	45
55	43	31	39	63	39	27	78	53	44	37	31
J=5											
20	56	11	9	3	3	4	9	13	8	11	10
15	21	15	4	3	24	24	5	1	0	0	3
J=6											
283	200	362	375	444	412	332	356	392	379	357	348
381	368	330	358	391	379	333	336	391	410	408	471
торцевые модули; 5-нижних, 5 верхних											
0	0	0	0	0							
0	0	0	0	0							
Относительные погрешности моделирования поглощаемого элементами РТО потока излучения, исходящего от Солнца и Луны на посадочной орбите.											
В верхней плоскости-плоскости РТО											
0.0066	0.0064	0.0067	0.0066	0.0073	0.0074	0.0079	0.0077	0.0079	0.0074	0.0074	0.0068
0.0069	0.0064	0.0067	0.0065	0.0070	0.0069	0.0073	0.0069	0.0071	0.0066	0.0069	0.0066
0.0070	0.0067	0.0071	0.0069	0.0074	0.0073	0.0077	0.0075	0.0078	0.0074	0.0075	0.0070
0.0071	0.0066	0.0069	0.0066	0.0071	0.0069	0.0073	0.0069	0.0070	0.0065	0.0067	0.0063
0.0166	0.0159	0.0165	0.0160	0.0173	0.0173	0.0183	0.0179	0.0182	0.0172	0.0174	0.0163
0.0166	0.0157	0.0167	0.0163	0.0175	0.0172	0.0179	0.0171	0.0175	0.0165	0.0171	0.0164
0.0171	0.0165	0.0173	0.0167	0.0175	0.0170	0.0179	0.0174	0.0180	0.0173	0.0177	0.0167
0.0171	0.0161	0.0168	0.0163	0.0173	0.0170	0.0178	0.0172	0.0176	0.0166	0.0170	0.0161
0.0040	0.0026	0.0034	0.0022	0.0041	0.0038	0.0052	0.0044	0.0049	0.0033	0.0040	0.0025
0.0035	0.0022	0.0039	0.0033	0.0053	0.0047	0.0057	0.0042	0.0047	0.0030	0.0040	0.0029
0.0041	0.0032	0.0044	0.0034	0.0046	0.0036	0.0049	0.0039	0.0051	0.0039	0.0047	0.0032
0.0038	0.0023	0.0036	0.0027	0.0045	0.0040	0.0054	0.0044	0.0053	0.0038	0.0046	0.0031
-0.0388	-0.0411	-0.0402	-0.0426	-0.0402	-0.0413	-0.0395	-0.0411	-0.0402	-0.0423	-0.0405	-0.0421
-0.0401	-0.0419	-0.0392	-0.0405	-0.0379	-0.0391	-0.0379	-0.0402	-0.0393	-0.0419	-0.0402	-0.0420
-0.0400	-0.0416	-0.0396	-0.0412	-0.0393	-0.0410	-0.0390	-0.0407	-0.0389	-0.0408	-0.0395	-0.0417
-0.0405	-0.0426	-0.0406	-0.0421	-0.0395	-0.0405	-0.0384	-0.0399	-0.0384	-0.0404	-0.0386	-0.0405
Среднеинтегральная и среднеквадратичная по поверхности РТО погрешности воспроизведения требуемой нагрузки.											
-0.0001	0.0114										
tau=1600 с.											
QW_RTO - расчетное значение плотности поглощаемого теплового потока, Вт/м ²											
280.00											
Относительные значения величин интенсивности излучения модулей имитатора, размещенных на боковой поверхности, по отношению к максимальной интенсивности излучения одного из модулей											
J-номер яруса											

J=1											
0.24	0.29	0.26	0.25	0.28	0.30	0.23	0.26	0.31	0.26	0.27	0.25
0.30	0.28	0.27	0.26	0.27	0.30	0.25	0.29	0.27	0.28	0.24	0.31
J=2											
0.22	0.05	0.11	0.11	0.15	0.11	0.09	0.12	0.13	0.11	0.12	0.09
0.11	0.13	0.12	0.07	0.12	0.18	0.07	0.08	0.16	0.15	0.06	0.08
J=3											
0.12	0.22	0.10	0.18	0.21	0.15	0.13	0.18	0.20	0.16	0.14	0.17
0.21	0.19	0.13	0.17	0.19	0.18	0.14	0.18	0.22	0.15	0.10	0.26
J=4											
0.32	0.06	0.10	0.19	0.20	0.12	0.11	0.16	0.19	0.14	0.11	0.15
0.16	0.14	0.11	0.15	0.20	0.14	0.08	0.14	0.19	0.17	0.10	0.07
J=5											
0.11	0.03	0.11	0.14	0.11	0.06	0.00	0.01	0.12	0.01	0.00	0.13
0.20	0.06	0.05	0.15	0.11	0.05	0.12	0.16	0.01	0.00	0.03	0.07
J=6											
0.28	0.46	0.38	0.17	0.27	0.86	0.37	0.51	0.96	0.39	0.40	0.48
0.63	0.14	0.34	0.46	0.58	0.34	0.00	0.82	0.61	0.50	0.36	1.00
Торцевые модули											
0.06	0	0	0	0.07							
0.04	0	0	0	0.04							
Величины электрических мощностей, подводимых к модулям боковой поверхности имитатора, [Вт].											
J=1											
106	128	115	111	122	132	102	113	135	114	117	109
130	122	116	113	119	129	107	127	117	121	105	137
J=2											
96	22	48	50	65	47	37	54	57	46	52	41
49	57	54	32	51	76	29	35	68	64	25	35
J=3											
51	97	43	79	92	67	56	79	87	70	62	74
90	81	56	76	84	78	59	78	94	64	46	112
J=4											
141	24	45	81	86	54	47	71	84	59	46	66
68	62	46	64	87	60	37	62	82	76	42	32
J=5											
48	14	48	59	46	26	0	3	51	3	0	55
87	27	23	67	46	21	52	69	6	0	13	30
J=6											
122	199	164	73	117	373	161	220	416	172	175	211
274	61	149	202	252	146	0	359	267	219	156	436
торцевые модули;5-нижних, 5 верхних											
54	0	0	0	62							

35	0	0	0	33							
Относительные погрешности моделирования поглощаемого элементами РТО потока излучения, исходящего от Солнца и Луны на посадочной орбите. В верхней плоскости-плоскости РТО											
0.0170	0.0169	0.0170	0.0168	0.0177	0.0183	0.0193	0.0199	0.0205	0.0207	0.0210	0.0209
0.0209	0.0204	0.0201	0.0195	0.0196	0.0191	0.0185	0.0175	0.0171	0.0164	0.0168	0.1690
0.0172	0.0170	0.0170	0.0166	0.0171	0.0174	0.0183	0.0188	0.0192	0.0192	0.0193	0.0190
0.0191	0.0187	0.0188	0.0185	0.0186	0.0182	0.0175	0.0165	0.0164	0.0160	0.1650	0.0166
0.0222	0.0219	0.0220	0.0215	0.0232	0.0241	0.0258	0.0266	0.0278	0.0280	0.0288	0.0286
0.0288	0.0280	0.0277	0.0266	0.0272	0.0266	0.0258	0.0239	0.0230	0.0214	0.0221	0.0220
0.0225	0.0221	0.0222	0.0215	0.0224	0.0227	0.0246	0.0255	0.0264	0.0262	0.0264	0.0257
0.0259	0.0254	0.0260	0.0258	0.0262	0.0254	0.0241	0.0219	0.0219	0.0210	0.0218	0.0216
0.0115	0.0104	0.0092	0.0064	0.0072	0.0061	0.0175	0.0185	0.0201	0.0201	0.0215	0.0214
0.0220	0.0210	0.0209	0.0194	0.0209	0.0204	0.0192	0.0066	0.0072	0.0062	0.0090	0.0100
0.0110	0.0100	0.0089	0.0061	0.0055	0.0035	0.0165	0.0185	0.0199	0.0194	0.0196	0.0183
0.0188	0.0181	0.0196	0.0196	0.0205	0.0192	0.0166	0.0041	0.0063	0.0070	0.0097	0.0103
-0.0067	-0.0083	-0.0097	-0.0136	-0.0119	-0.0136	-0.0139	-0.0174	-0.0073	-0.0076	-0.0053	-0.0050
-0.0035	-0.0047	-0.0046	-0.0068	-0.0040	-0.0135	-0.0107	-0.0116	-0.0112	-0.0136	-0.0096	-0.0087
-0.0072	-0.0087	-0.0097	-0.0133	-0.0135	-0.0163	-0.0144	-0.0155	-0.0044	-0.0052	-0.0049	-0.0069
-0.0058	-0.0070	-0.0045	-0.0044	-0.0030	-0.0135	-0.0133	-0.0157	-0.0124	-0.0119	-0.0086	-0.0083
Среднеинтегральная и среднеквадратичная по поверхности РТО погрешности воспроизведения требуемой нагрузки.											
-0.0002	0.0171										
tau=2000 с.											
QW_RTO - расчетное значение плотности поглощаемого теплового потока, Вт/м ²											
270.00											
Относительные значения величин интенсивности излучения модулей имитатора, размещенных на боковой поверхности, по отношению к максимальной интенсивности излучения одного из модулей											
J-номер яруса											
J=1											
0.23	0.27	0.24	0.23	0.25	0.29	0.21	0.23	0.29	0.24	0.26	0.22
0.27	0.26	0.25	0.23	0.25	0.29	0.21	0.26	0.25	0.27	0.20	0.29
J=2											
0.22	0.04	0.10	0.11	0.14	0.09	0.08	0.13	0.11	0.09	0.13	0.09
0.09	0.13	0.13	0.06	0.10	0.18	0.07	0.06	0.14	0.15	0.05	0.07
J=3											
0.13	0.21	0.08	0.17	0.20	0.13	0.11	0.17	0.18	0.15	0.14	0.14
0.17	0.18	0.12	0.15	0.17	0.18	0.12	0.13	0.22	0.15	0.08	0.23
J=4											
0.28	0.05	0.09	0.17	0.19	0.11	0.10	0.16	0.17	0.12	0.09	0.15
0.14	0.15	0.09	0.13	0.18	0.14	0.11	0.13	0.16	0.15	0.10	0.07
J=5											
0.14	0.08	0.15	0.12	0.11	0.10	0.00	0.00	0.12	0.03	0.00	0.09
0.25	0.04	0.02	0.21	0.13	0.00	0.06	0.20	0.00	0.00	0.00	0.07
J=6											
0.00	0.22	0.41	0.06	0.15	0.80	0.22	0.36	0.99	0.36	0.36	0.36
0.56	0.00	0.26	0.41	0.55	0.24	0.00	0.70	0.59	0.53	0.35	1.00
Торцевые модули											

Выводы по главе 4

Представленный в диссертационной работе методический подход к определению оптимальных режимов работы модулей инфракрасных имитаторов, реализованный применительно к тепловакуумной установке ВК600/300 в виде компьютерной программы, позволяет с помощью вычислительных экспериментов выявлять такие энергетические режимы эксплуатации модулей имитатора, при которых достигается максимально возможная точность моделирования внешних тепловых нагрузок на поверхность испытываемого объекта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

В диссертационной работе получены следующие результаты:

1. Установлено, что целевая функция, определяющая оптимальный энергетический режим работы инфракрасных имитаторов, имеет, по крайней мере, три точки минимума при малоотличающихся значениях самих минимумов. Данный вывод является результатом сравнительного исследования трех методов оптимизации, два из которых являются градиентными и впервые применены в решении задач рассматриваемого класса.
2. Разработаны экспериментальный и аналитический методы определения коэффициента связи между мощностью, подводимой к модулям имитатора с линейчатыми излучателями, и интенсивностью их излучения.
3. Разработан новый метод решения задачи экспериментального моделирования внешних тепловых нагрузок с помощью сетчатых нагревателей. Проведено сравнение с известным методом, показано преимущество разработанного метода в отношении точности моделирования.
4. Проведено исследование возможности использования кварцевых галогенных ламп накаливания в составе инфракрасного имитатора с условно точечными излучателями, испускающими в сторону испытуемого объекта излучение по спектральному составу близкому к излучению черного тела. Разработана принципиальная схема модуля такого имитатора.
5. Показана эффективность градиентных методов оптимизации энергетических режимов работы инфракрасных имитаторов на примере решения задачи термостатирования изделия «Спектр-РГ» при проведении его комплексных электрических испытаний и решения задачи воспроизведения внешних тепловых нагрузок на изделие «Луна-Глоб» в условиях тепловакуумной установки ВК600/300.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

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

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

- теплообмен космических аппаратов. -М.: Машиностроение, 1977. -104 с.
30. Колесников А.В. К вопросу о воспроизведении в экспериментальных установках модели спектра теплового излучения планет. //ИФЖ, Минск, 1986, т.50, №2, с. 324-329.
31. Колесников А.В. Методика расчета интенсивности излучения линейчатых излучателей имитаторов внешних тепловых потоков. //ИФЖ, Минск, 1983, т.45, №1, с. 152-153. Деп. в ВИНТИ №1072-83.
32. Колесников А.В. Погрешности имитации поля теплового излучения планет // ИФЖ. - Минск, 1980. - том 39, №2. - 0,356-357. -Деп. в ВИНТИ, 1040-80.
33. Колесников А.В. Приближенное моделирование теплового воздействия планет на космические аппараты. //В тематич. сб.науч.тр.: Проектирование теплонагруженных конструкций.-М.: Изд-во МАИ, 1989, с. 6-16.
34. Колесников А.В., Сербин В.И. Моделирование условий внешнего теплообмена космических аппаратов.-М.:”Информация –XXI век”,1997,- 170с.
35. Колесников А.В., Палешкин А.В. Численный метод выбора энергетического режима работы сетчатого нагревателя. Труды МАИ, 2010, №19.
36. Крянев А.В. Итерационный метод решения некорректных задач. // ЖВМ и МФ. – 1974. – Т.14, №1.-С. 25-35.
37. Космический комплекс “Луна-Глоб”. Дополнение к эскизному проекту. Пояснительная записка. Часть 15. Средства обеспечения теплового режима. ЛГ-0000-0 ПЗ-214.
38. Космонавтика: Энциклопедия / гл. ред. В.П.Глушко; Редколлегия: В.П.Бармин, К.Д.Бушуев и др. –М.: Сов. Энциклопедия, 1985. -528 с.
39. Малоземов В.В. Тепловой режим космических аппаратов. – М.: Машиностроение, 1980.- 232
40. Моделирование и отработка тепловых режимов летательных аппаратов.

- Учебное пособие /Б.М.Панкратов, В.С. Хохулин, В.П. Дронов, А.В.Колесников. Под ред. Б.М.Панкратова.-М.: Из-во МАИ,1990.-228с.
41. Нусинов М.Д. Воздействие и моделирование космического вакуума. –М.: Машиностроение,1982. -176 с.
42. Околоземное космическое пространство. / Справочные данные под ред. Ф.С. Джонсона. Пер. с англ. –М.: Мир, 1966. – 191 с.
43. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике. /Авдеевский В.С., Галицейский Б.М., Глебов Г.А. и др.. под ред. проф. В.К.Кошкина. -М.: Машиностроение, 1975. -623 с.
44. Панкратов Б.М. Основы теплового проектирования транспортных космических систем. – М.: Машиностроение, 1988. -304 с.
45. Палешкин А.В., Колесников А.В. Оптимизация энергетического режима работы имитатора внешних тепловых нагрузок. // Электронный журнал “Труды МАИ”, 2010 г. №37.
46. Палешкин А.В., Колесников А.В. Численный метод моделирования внешнего теплообмена космического аппарата с произвольной формой наружных поверхностей. // Вестник МАИ, 2019, №17, т.4.
47. Палешкин А.В. Исследование и разработка методов моделирования внешнего теплообмена космических аппаратов с помощью инфракрасных источников излучения. //Кандидатская диссертация. 2011г.
48. Мишин В.П., Алифанов О.М. Обратные задачи теплообмена - области применения при проектировании и испытаниях технических объектов. //ИФЖ.- 1982. – Т.42, №2.- С. 181-192.
49. Пехович А.И., Жидких В.М. Расчеты теплового режима твердых тел. 2-е изд., доп. и перераб. -Л.: Энергия, 1976. -352 с.
50. Поток энергии Солнца и его измерения : Сб. статей. //Под ред.О.Уайта, пер. с англ. -М.: Мир, 1980. -558 с.
51. Спэрроу Э.М., Сесс Р.Д. Теплообмен излучением. /Пер. с англ. -М.: Энергия, 1971. -296 с.

52. Теплообмен и тепловой режим космических аппаратов. /Под ред. Дж.Лукаса, пер. с англ. по ред. Н.А.Анфимова. -М.: Мир, 1974. -543 с.
53. Термовакuumные испытания лунного отсека КА “Апполон” с использованием конформных управляемых нагревателей. Пер. № 08-484, ГОНТИ-I, 1971.
54. Фаворский О.Н., Каданер Я.С. Вопросы теплообмена в космосе –М.: Высшая школа, 1972. -280 с.
55. Экспериментальная отработка космических летательных аппаратов / В.А.Афанасьев, В.С. Барсуков, М.Я. Гофин, Ю.В.Захаров, А.Н.Стрельченко, Н.П.Шалунов; Под редакцией Н.В.Холодкова. – М.: Изд-во МАИ, 1994. - 412с.
56. Trausactions of the Third International Vakuu Congress, Volume 1, 1966.
57. Katzoff S. Similatude in Thermal Models of Spacekraft, NASA TN, D-1631, 1963, April.
58. AIAA Space Simulation Testing Conference, 1964, 1966.
59. Chao B.T., Wedeking G.L. Simulariti criterial for thermal modeling of Spacescraft. Journal of Spacescraft and Rockets. 1965,V.2. №2.
60. Santeller D.S., Jones D.W., Holheboer D.H. Vacuum Technologu and Space Simulation. NASA, 1966.
61. Розенберг М.Я. Теоретический анализ погрешностей в имитации окружающих условий космической среды. Пер. № 014-67, ГОНТИ –I, 1967.
62. Установки, имитирующие условия полета космического летательного аппарата. / По материалам иностранной печати /. Обзор ЦАГИ № 81, 1963.
63. Русин С.П., Палецкий В.Э. Тепловое излучение полостей. М.: Энергоатомиздат, 1987, 153 с.
64. Р.Хадсон. Инфракрасные системы. Перевод с английского под ред. Н.В. Васильченко. М. “Мир”. 1972.
65. Фридман В.М. О сходимости методов типа наискорейшего спуска. // Успехи математ. наук. – 1962. – Т. 17, вып. 3. – С. 201 – 208.

66. Мамедова К.И., Колесников А.В., Палешкин А.В. Градиентные методы оптимизации режима работы имитатора внешних тепловых нагрузок. Статья. Тепловые процессы в технике. 2014. Т. 6. № 11. с. 522-528.
67. Мамедова К.И., Колесников А.В., Палешкин А.В. Методика выбора оптимального энергетического режима работы сетчатого нагревателя. Статья. Тепловые процессы в технике. 2015. Т. 7. № 1. с. 37-42
68. Мамедова К.И., Колесников А.В., Палешкин А.В. Методика оценки влияния погрешностей моделирования внешних тепловых нагрузок на тепловое состояние КА. Статья. Тепловые процессы в технике. 2015 Т. 7, № 9, с. 417-422.
69. Мамедова К.И. Палешкин А.В. Моделирование расчетных внешних тепловых нагрузок к поверхности космического аппарата с помощью инфракрасных нагревателей. Статья. Вестник МАИ. 2016, №12, Т.85.