

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 летательных аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва 2016

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» на кафедре 610 «Управление эксплуатацией ракетно-космических систем»

**Научный руководитель:**

д.т.н., с.н.с., профессор кафедры 610 «Управление эксплуатацией ракетно-космических систем» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» – Колесников Анатолий Васильевич

**Официальные оппоненты:**

д.т.н., заведующий кафедрой «Ракетно-космические композитные конструкции» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

– **Сергей Васильевич Резник**

к.т.н., заведующий лабораторией федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт космических исследований Российской академии наук» – **Николай Петрович Семена**

**Ведущая организация:**

федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина»

Защита диссертации состоится «28» декабря 2016 г. в 9:00 часов на заседании Диссертационного совета 212.125.10 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, направлять по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» ученому секретарю диссертационного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского авиационного института (национального исследовательского университета) и на сайте [http://www.mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT\\_ID=74047](http://www.mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=74047)

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

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

А.Р.Денискина

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность работы**

Одним из неперенных условий надежного функционирования космического аппарата (КА) является обеспечение необходимого теплового режима всех его элементов.

Математическое моделирование теплообмена большинства типов космических аппаратов связано с рядом трудностей, обусловленных, главным образом, сложностью и значительной неопределенностью протекания физико-химических процессов, формирующих тепловое состояние элементов КА. В связи с этим большое значение при создании космических аппаратов имеют экспериментальные исследования, при проведении которых осуществляется физическое моделирование процессов внешнего и внутреннего теплообмена, протекающих в них в условиях штатной эксплуатации. Физическое моделирование внутреннего теплообмена не вызывает особых затруднений, если исследуемый объект моделируется достаточно корректно, что в большинстве случаев вполне осуществимо.

Физическое моделирование внешнего теплообмена гораздо сложнее, так как воспроизведение в наземных экспериментальных установках факторов космической среды, оказывающих воздействие на тепловое состояние КА, при одновременном воспроизведении изменения его ориентации относительно источников внешних тепловых потоков – задача чаще всего практически неразрешимая. Поэтому даже при наличии в экспериментальной установке достаточно совершенного имитатора Солнца почти всегда возникает необходимость дооснащения этой установки дополнительными средствами внешнего нагрева. Одни из них могут моделировать воздействие на КА потоков собственного и отраженного солнечного излучения планет, другие – влияние на испытуемый объект частей того же аппарата, не вмещающихся в экспериментальную установку, и т.п. В качестве дополнительных средств нагрева используются различные

по конструкции и по способу подвода энергии упрощенные средства. Но они имеют общую особенность, заключающуюся в том, что основная энергия испускаемого ими излучения сосредоточена в средней и дальней инфракрасной полосе спектра с длиной 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. Но практическое использование указанных имитаторов сопряжено с необходимостью преодоления больших трудностей, связанных с выбором таких энергетических режимов эксплуатации имитаторов, при реализации которых обеспечивалась бы требуемая точность моделирования тепловых нагрузок. Трудности обусловлены тем, что имитаторы не воспроизводят параметры поля излучения источников, тепловое воздействие которых на поверхность КА они призваны воспроизводить во время испытаний. С их помощью можно воспроизвести только расчетные значения внешних тепловых нагрузок, источником которых могут быть Солнце, тепловое излучение планет и т.п. Возникает сложная задача управления энергетическими характеристиками имитаторов, заключающаяся в определении и реализации таких режимов эксплуатации излучающих элементов, при которых расчетные внешние тепловые нагрузки воспроизводились бы наилучшим образом в рамках возможностей применяемой имитационной системы. Используемые методы оптимизации энергетических режимов работы инфракрасных имитаторов не в полной мере удовлетворяют потребностям практики. Остается нерешенным вопрос о единственности получаемого решения. В этой связи весьма актуально проведение исследований по данному вопросу.

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 их, но и от радиационных характеристик их отражающих поверхностей (если в состав модулей входят отражатели), режимов 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.

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 в случае сложной формы наружной поверхности испытываемого объекта. Поэтому актуальной является задача создания имитатора с условно точечными излучателями, в котором бы с использованием удобных в эксплуатации источников энергии обеспечивался ее подвод к элементам модуля, испускающим излучение в инфракрасной полосе спектра.

### **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 испытуемых 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.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертации, определяется цель работы и перечисляются задачи, которые должны быть решены для достижения поставленной цели.

**В первой 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.

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 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 первой главе диссертации. Но помимо анализа перечисленных известных имитационных средств в главе 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. Приводится с необходимым обоснованием описание принципиальной схемы модуля такого имитатора. Схема модуля представлена на рис.1.

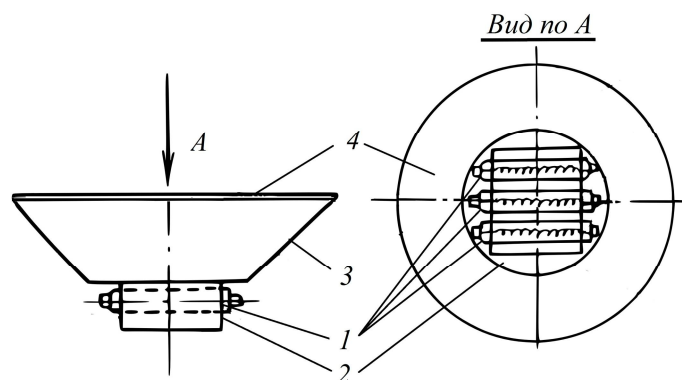


Рис. 1. Принципиальная схема модуля имитатора:  
 1 – источник лучистой энергии (лампы типа КГМ- 220-1000), 2 –  
 отражатель, 3 – конический отражатель, 4 – излучатель.

В состав модуля входят две-три параллельно запитываемые лампы типа КГМ-220-1000, отражатели и плоский излучатель, имеющий черное покрытие.

Использование в одном модуле двух-трех параллельно запитываемых ламп и размещение их в отражателе 2 (рис.1) 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 выполнение этого условия может быть обеспечено за счет эксплуатации ламп на щадящем режиме, то есть при подведении к ним мощности значительно меньшей 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 (рис.1). 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, что 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.

**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.

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. Хотя контроль величин  $J_j(0)$  является непростой задачей, однако всегда можно для каждой конкретной радиационно-оптической схемы и конструкции модуля имитатора и заданной тепловакуумной камеры установить зависимость между  $J_j(0)$  и другими проще контролируемыми параметрами модулей, например, подводимой к модулю электрической мощностью или температурой его излучающих поверхностей.

В качестве критерия оптимальности режима работы имитатора рассматривается минимум целевой функции  $\psi$ , представляющей собой сумму квадратов «взвешенных» погрешностей  $\Delta q_i$  воспроизведения расчетных значений  $q_i^0$  внешних тепловых потоков к выделенным тепловоспринимающим элементам испытываемого объекта. Величина  $\Delta q_i$  равна разности между плотностью потока  $q_i$  излучения, поглощаемого каким-то  $i$ -ым тепловоспринимающим элементом испытываемого объекта в

условиях экспериментальной установки и заданным значением плотности теплового потока  $q_i^0$ , подводимого по расчетам к этому элементу в штатных условиях эксплуатации. При этом  $q_i = \sum_{j=1}^n \pi \cdot A_{di-j} \cdot \Phi(\vec{r}) \cdot \varphi_{di-j} \cdot J_j(0)$ , где  $A_{di-j}$  – интегральная поглощательная способность  $i$ -го элемента по отношению к излучению  $j$ -го излучателя;  $\varphi_{di-j}$  – локальный угловой коэффициент  $i$ -го элемента и  $j$ -го излучателя;  $\Phi(\vec{r})$  – индикатриса излучения;  $\vec{r}$  – единичный вектор, направленный от  $j$ -го излучателя к  $i$ -тому элементу;  $n$  – число излучателей.

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

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

где  $b_i$  – весовой коэффициент.

Рассматривались два подхода к решению задачи определения оптимального режима работы инфракрасных имитаторов.

Первый, известный подход, заключается в том, что для определения оптимальных значений  $J_j(0)$  решается задача нахождения минимума функции  $\psi$  как функции  $n$  переменных  $J_j(0)$   $j = 1, 2, \dots, n$  при следующих естественных ограничениях на искомые величины  $J_j(0)$ :

$$J_j(0) \geq 0; J_j(0) \leq J_{MAX} \quad (2),$$

где  $J_{MAX}$  – максимально допустимая интенсивность 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) система решается итерационным методом. Такой способ решения задачи порождает следующие вопросы: является ли такой способ наилучшим из всех возможных и является ли выявленная точка минимума функционала единственной?

Представленный в диссертационной работе второй подход к решению задачи определения оптимального режима работы инфракрасных имитаторов основан на использовании градиентных методов минимизации целевой функции  $\psi$ , а именно – метода наискорейшего спуска и метода сопряженных градиентов.

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

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

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

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

Данная задача в экстремальной постановке сводится к минимизации невязки, то есть функции  $\psi(J(0))$ . Воспользуемся итерационным алгоритмом оптимизации вектора  $J(0)$ :  $J^{(k+1)}(0) = J^{(k)}(0) + \Delta J^{(k)}(0)$ , при этом  $J^{(0)}(0)$  – начальное приближение искомого вектора, задаваемое в значительной

степени произвольно. В качестве приращения  $\Delta J^{(k)}$  при переходе к следующему приближению используется вектор  $\Delta J^{(k)} = -\beta^{(k)} \cdot I^{(k)}$ , где  $I^{(k)}$  – векторная величина, определяющая направление перехода от вектора  $J^{(k)}(0)$  к вектору  $J^{(k+1)}(0)$  (направление спуска), а  $\beta^{(k)}$  – скалярная величина, характеризующая длину шага вдоль этого направления (глубину спуска). Направление спуска можно определять одним из двух известных методов: методом скорейшего спуска или методом сопряженных градиентов. В диссертационной работе рассматриваются и тот и другой метод.

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

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

Метод сопряженных градиентов отличается от метода скорейшего спуска алгоритмом расчета направления спуска. Если обозначить через  $S$  вектор, определяющий направление спуска, то при реализации метода сопряженных градиентов переход от значения этого вектора в предыдущей

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

Рассмотренные 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 компьютерной программы в Фортране, 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 были расположены в виде 6 поясов (рядов). В каждом ряду находились 24 излучателя, размещаемых равномерно по окружности с угловым шагом  $15^\circ$ . 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.

В диссертации приводятся результаты расчета погрешностей моделирования заданного распределения плотности поглощаемого поверхностью испытываемого объекта теплового потока. Погрешности приводятся для 6 равноотстоящих друг от друга поперечных сечений цилиндрической поверхности. В каждом сечении находятся 48 элементарных

тепловоспринимающих площадок. На приведенных в диссертации графиках по оси абсцисс откладываются номера  $i$  точек в каждом сечении ( $i = 1; 2; \dots; 48$ ), а по оси ординат отношение абсолютных погрешностей  $\Delta q$  к характерной величине  $q_{хар} = 460 \frac{Вт}{м^2}$ .

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что градиентные методы оптимизации и метод, основанный на использовании необходимого условия существования экстремума функции многих переменных дают мало отличающиеся результаты по погрешностям, 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 во второй главе работы значительное внимание уделяется методам определения угловых коэффициентов между тепловоспринимающими элементами испытываемого объекта и элементами излучающих модулей имитаторов. Рассматриваются универсальный численно-аналитический метод, метод расчета угловых коэффициентов для имитаторов с линейчатыми излучателями и новый метод определения угловых коэффициентов для имитаторов с сетчатыми нагревателями.

При использовании сетчатых нагревателей возникает необходимость определения угловых коэффициентов тепловоспринимающих элементов с нитями сетчатых нагревателей. Известен достаточно эффективный и хорошо апробированный в реальных экспериментах метод, основанный на аппроксимации поверхности следующих друг за другом мелких участков каждой нити излучателя поверхностями многогранников с треугольными гранями. Однако открывается возможность существенного упрощения алгоритма расчета угловых коэффициентов, если обратить внимание на следующее очень важное обстоятельство. Можно считать, что 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  $\Omega$ , проходящей через ось нити и вектор  $\vec{\rho}_{dj-di}$  с началом в центральной точке этого плоского элемента и концом - в центральной точке элемента  $dF_i$  тепловоспринимающей поверхности (см. рис.2)

Данное предположение может быть принято в связи с тем, что диаметр излучающей нити  $d$  во много раз меньше расстояния  $\rho$  до тепловоспринимающих элементов ( $d/\rho \leq 0,01$ ). Вследствие этого лучи, исходящие из точек тепловоспринимающих элементов, с высокой точностью можно считать параллельными. Так при  $d/\rho \leq 0,01$  угол расходимости лучей не превышает  $0,29^\circ$ .

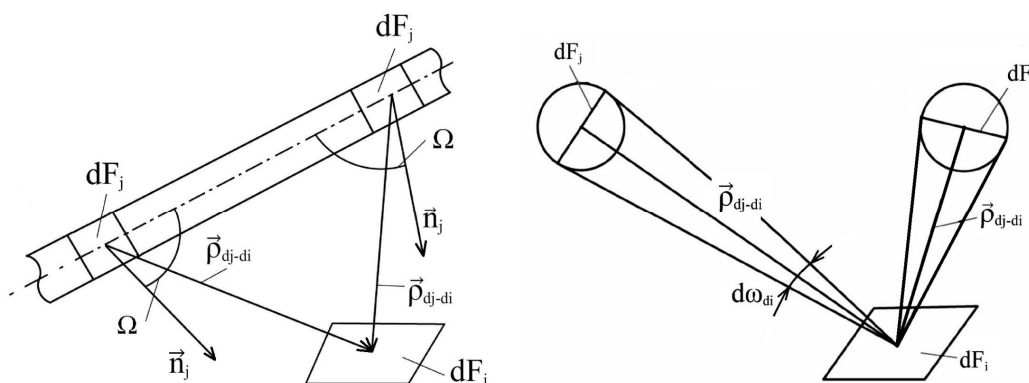


Рис.2. Иллюстрация принципа замены участка излучающей нити плоским элементом.

В диссертационной работе с необходимым обоснованием представлен алгоритм расчета угловых коэффициентов между тепловоспринимающими элементами и нитями сетчатого нагревателя.

Обычно у сетчатых нагревателей диаметр  $d$  излучающей нити мал по сравнению с расстоянием между соседними нитями  $\Delta z$  ( $\Delta z/d > 10$ ), в то время как расстояние до облучаемой поверхности превышает величину  $\Delta z$  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 ( $\varphi_{di-нагр}$ ) определяется путем суммирования локальных угловых коэффициентов этого элемента со всеми нитями нагревателя.

Для выбора оптимального значения подводимой к нагревателю мощности введем в рассмотрение функцию  $\psi(W) = \sum_{i=2}^N \left( \frac{W \cdot \varphi_{di-нагр}}{\pi \cdot d \cdot l \cdot m} - q_i^o \right)^2$  где

$q_i^o$  - локальная плотность теплового потока, которую надлежит воспроизводить с помощью сетчатого нагревателя,  $N$  - число тепловоспринимающих элементов,  $m$  - число нитей.

Производная этой функции по переменной  $W$  имеет следующий вид:

$$\frac{d\psi}{dW} = \frac{2}{(\pi \cdot d \cdot l \cdot m)^2} \cdot \sum_{i=1}^N (W \cdot \varphi_{di-нагр} - q_i^o \cdot \pi \cdot d \cdot l \cdot m) \cdot \varphi_{di-нагр}$$

Функция  $\psi(W)$  будет иметь минимум в точке, обращающей производную  $d\psi/dW$  в ноль.  $d\psi/dW = 0$  при  $W = \frac{\sum_{i=1}^N \pi \cdot q_i^o \cdot d \cdot l \cdot m \cdot \varphi_{di-нагр}}{\sum_{i=1}^N \varphi_{di-нагр}}$ . Такое

значение  $W$  обеспечивающее минимальное значение среднеквадратичной погрешности воспроизведения заданных внешних тепловых нагрузок  $q_i^o$  (1,2...N.) и будет считаться оптимальным значением величины  $W$ .

**В третьей главе** диссертации излагаются экспериментальный и аналитический подходы к определению зависимости интенсивности

излучения модулей имитаторов от подводимой к ним электрической мощности.

Рассмотренные в диссертации методики выявления оптимальных энергетических режимов работы инфракрасных имитаторов позволяют выявить лишь 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. Поэтому необходимым условием реализации оптимального энергетического режима эксплуатации имитатора является установление связи между интенсивностью излучения модулей имитатора и подводимой к ним электрической мощностью.

Целесообразнее всего эту связь выявлять экспериментально. Данную экспериментальную работу можно провести как попутную с какими-либо испытаниями, поскольку этот эксперимент будет непродолжительным – менее двух часов. Излучающий модуль, например, метровой длины размещается в тепловакуумной камере, оснащенной криогенными экранами. На некотором расстоянии от выходного сечения отражателя модуля (на расстоянии не менее 0,5 м, но не более 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, близкий к стационарному уровень.

Зарегистрированные в эксперименте величины плотности тепловых потоков, падающих на теплоприемники датчиков, используются затем как

входная информация в разработанной компьютерной программе определения оптимальных значений интенсивности излучения модуля имитатора. Кроме этого в программу вводится информация об относительном расположении модуля и датчиков в экспериментальной установке. На основе этих входных данных выполняется расчет значения интенсивности излучения модуля, при котором на поверхности теплоприемников датчиков реализуются замеренные в эксперименте значения плотности теплового потока. Сопоставляя расчетные значения интенсивности излучения модуля и значение подводимой в эксперименте электрической мощности, устанавливается связь между интенсивностью излучения и мощностью.

Аналитический подход к решению задачи определения искомой зависимости иллюстрируется на примере рассмотрения инфракрасного имитатора (ИКИ) установки ВК600/300. В этом имитаторе с целью повышения коэффициента полезного использования подводимой энергии излучатель модуля (токопроводящая лента) заключался в специальный отражатель, ограничивающий угол выхода излучения в плоскости, перпендикулярной оси модуля. Этот угол, отсчитываемый от центральной продольной плоскости модуля, составляет величину, приблизительно равную  $30^\circ$ . Исходя из величины этого угла, а также исходя из особенностей оптической схемы системы «излучатель-отражатель» была принята упрощенная индикатриса излучения модуля  $\Phi(\vec{r})$  на выходе из плоскости среза отражателя. Считалось, что  $\Phi(\vec{r})$  зависит только от угла  $\theta_{ji}$  отсчитываемого от нормали излучателя в плоскости, перпендикулярной оси модуля. Причем эта зависимость может быть представлена так: при  $|\theta_{ji}| \leq .523$   $\Phi(\theta_{ji}) = 1$ , при  $|\theta_{ji}| > .523$   $\Phi(\theta_{ji}) = 0$ .

Рассматривалась задача имитации воздействия потока излучения плотностью  $400 \text{ Вт/м}^2$  ( $q_w = 400$ ) на поверхность черного бесконечно протяженного кругового цилиндра, размещенного в бесконечно длинном

цилиндрическом имитаторе, модули которого расположены равномерно по окружности с угловым шагом  $7,5^\circ$ .

Предположим, что коэффициент  $\eta$  полезного использования подводимой к модулю энергии равен 0,8 и вся энергия излучения имитатора при заданной индикатрисе излучения его модулей попадает на облучаемую поверхность.

Расчеты, выполненные с помощью разработанной компьютерной программы оптимизации режима работы имитатора показывают, что при  $q_w = 400 \frac{Вт}{м^2}$  величина интенсивности излучения модулей должна составлять величину приблизительно равную  $J(j) \approx 4258 \frac{Вт}{м^2 \text{стерад}}$ . Сопоставляя мощность модуля единичной длины  $W(j) = \frac{q_w \cdot \pi \cdot d}{\eta \cdot n}$  с величиной  $J(j)$ , получаем коэффициент  $C \approx 0.019$ . Для двухметрового модуля  $C \approx 0.038$ .

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

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 космической техники в последние годы стали проводить в тепловакуумных установках в условиях моделирования космического вакуума при поддержании требуемого теплового режима всех жизненно важных их элементов. В

средних и крупных по объему вакуумных камерах, в том числе и 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  $90\text{K}$ ) с тем, чтобы конденсировать и вымораживать на них газы и пары, выделяемые испытуемым объектом и элементами самой экспериментальной установки. В связи с этим возникает необходимость подвода к испытуемому объекту энергии, компенсирующей его потери и обеспечивающей в нем требуемый тепловой режим. Для этой цели в установке ВК600/300 используется инфракрасный имитатор (ИКИ), выполненный в виде совокупности условно линейчатых излучателей (модулей), которые могут располагаться вокруг испытуемого объекта.

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). В диссертации проанализированы особенности внешнего теплового нагружения изделия «Луна-Глоб» на различных этапах его эксплуатации. Выявлены четыре наиболее теплонапряженных этапов эксплуатации изделия. С помощью градиентных методов оптимизации выявлены значения интенсивностей излучения модулей ИКИ, при реализации которых во время предстоящих тепловакуумных испытаний заданные внешние тепловые нагрузки будут воспроизводиться наилучшим образом, разумеется, в пределах принципиальной возможности используемого имитатора.

## Основные результаты и выводы

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.

**Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. 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.
2. 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
3. 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.
4. 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
5. Актуальные проблемы российской космонавтики. Труды XXXIX академических чтений по космонавтике, посвященных памяти С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых-пионеров освоения космического пространства. Москва, 27-30 января 2015 года. Сборник тезисов докладов. – М.: Комиссия РАН.-2015. с. 247