

УДК 629. 78. 018

Численный метод выбора энергетического режима работы сетчатых нагревателей

Колесников А.В. , Палешкин А.В.

Аннотация

Излагается разработанный авторами методический подход и алгоритм решения задачи выбора энергетического режима работы сетчатых нагревателей, используемых для имитации внешних тепловых нагрузок на элементы наружной поверхности космического аппарата. Иллюстрируется эффективность данного подхода на примере решения модельных задач.

Ключевые слова

Имитация, тепловые нагрузки, космический аппарат, сетчатый нагреватель.

При проведении тепловых испытаний отдельных фрагментов космических аппаратов (КА) внешние тепловые нагрузки на поверхность испытуемого объекта часто воспроизводятся с помощью так называемых сетчатых нагревателей, выполняемых в виде токопроводящих сеток, размещаемых в непосредственной близости от тех участков поверхности испытуемого объекта, на которые эти излучатели должны воспроизводить расчетные внешние тепловые нагрузки [1,3,5]. Данный способ моделирования внешнего теплового воздействия имеет существенные преимущества по сравнению с другим также широко применяемым в практике тепловых испытаний способом - моделированием внешнего теплообмена с помощью конформных управляемых нагревателей [1,3], которые размещаются непосредственно на элементах наружной поверхности испытуемого объекта. В отличие от конформных нагревателей сетчатые нагреватели не изменяют теплофизические и радиационные свойства облучаемой поверхности и в незначительной степени экранирует эту поверхность.

Однако при использовании сетчатых нагревателей возникают трудности методического характера, связанные с необходимостью подбора такой подводимой к ним электрической мощности, при которой нужные тепловые нагрузки воспроизводились бы с наибольшей точностью. Обычно энергетический режим работы сетчатого нагревателя определяется экспериментально. Очевидно, что такой подход усложняет и затягивает процесс подготовки испытаний с использованием таких нагревателей. Попытки создания компьютерной программы решения этой задачи наталкивались на одну сложность, которая оказалась легко преодолимой. 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 нитью излучателя. Поэтому возникает необходимость в аппроксимации цилиндрических поверхностей каждой нити нагревателя поверхностями многогранников с элементарными гранями, характерные размеры которых малы по сравнению с расстоянием до тепловоспринимающей поверхности. Для этого каждая нить разбивается по длине на достаточно мелкие участки. 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, поскольку 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 попадающую на другой элемент, в данной работе рекомендуется сначала вычислять угловые коэффициенты граней излучателя с 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. Ниже приводится алгоритм, реализующий предлагаемый подход к определению плотности тепловых потоков, падающих на тепловоспринимающие элементы испытываемого объекта от излучающих нитей нагревателя.

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.1). 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 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 нормалей к плоскости этих элементов имеют 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 [4] соотношением:

$$d^2 Q_{dj \rightarrow di} = \frac{q_j^*}{\pi} dF_j^* \cdot \cos \varphi_j \frac{\cos \varphi_i \cdot dF_i}{\rho_{dj-di}^2}, \text{ где } q_{dj}^* = q_{dj} \frac{d}{d^*}.$$

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

$$q_{di} = q_{dj} \frac{d}{d^*} \cdot d\varphi_{di-dj} \quad (1),$$

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 - ым элементом с площадью dF_j^* , а $q_{dj} = \frac{W \cdot 4}{\pi \cdot d \cdot l \cdot m}$.

В выражении для q_{dj} 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.

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 ($\varphi_{di-нагр.}$) определяется путем суммирования локальных угловых коэффициентов этого элемента со всеми нитями нагревателя, то есть

$$\varphi_{di-нагр.} = \sum_{k=1}^m \varphi_{di-k}.$$

В кратко 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 [2], 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, подвергающаяся 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.

Кратко описанный методический подход был реализован в виде Фортран – программы расчета распределения плотности потока излучения, падающего от сетчатого излучателя на элементы непрерывных поверхностей различной формы. Предполагалось, что к сетчатому нагревателю подводится электрическая мощность, обеспечивающая воспроизведение заданной средней плотности потока излучения, падающей на рассматриваемую поверхность. На рисунках 2-4 приводятся результаты расчета локальных относительных погрешностей $\Delta \bar{q}$ воспроизведения заданных тепловых нагрузок на плоские тепловоспринимающие поверхности, имеющие форму квадрата. 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. В каждом сечении на поверхности нити задавались цилиндрические координаты 8 точек. Таким образом каждая нить аппроксимировалась поверхностью многогранника с 1584 гранями.

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), а также симметрии относительно центральных осей нагревателя, на графиках рисунков 3 - 5 результаты расчета погрешностей приводятся лишь для элементов с координатами $z_0 \in [0; 0,5b]$ и $x_0 \in [0; 0,5a]$. 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 3, 4, 5 соответствуют тепловоспринимающим панелям с размерами, соответственно равными 0,1×0,1 м, 0,25×0,25 м и 0,5×0,5 м.

Возникает вопрос о достоверности результатов, получаемых с помощью компьютерной программы, в которой реализован разработанный 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 [4,6] 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 разработанный методический подход и алгоритм определения энергетического режима работы сетчатых нагревателей обладает достаточно высокой точностью.

Библиографический список

1. Андрейчук О.Б., Малахов Н.Н. Тепловые испытания космических аппаратов.-М.: Машиностроение, 1982,-143с.
2. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А.Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов.-13-е издание, исправленное.-М.:Наука . 1966.-544с.
3. Моделирование тепловых режимов космических аппаратов и окружающей его среды./ Козлов Л.В., Нусинов М.Д. и др. Под ред. акад. Г.И.Петрова. – М.:Машиностроение,1971,-382с.
4. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением. / Пер. с англ. Под ред. Б.А.Хрусталева. – М.: Мир, 1975. – 234 с.
5. Колесников А.В., Сербин В.И. Моделирование условий внешнего теплообмена космических аппаратов.-М.:”Информация –XXI век”,1997,- 170с.
6. Ключников А.Д., Иванцов Г.П. Теплопередача излучением в огнетехнических установках. М., “Энергия”, 1970. -400 с.

Сведения об авторах:

Колесников Анатолий Васильевич, профессор; Московский авиационный институт (государственный технический университет), д.т.н., Московская обл., Химки, Ленинградское ш., 24, тел. 84955755425.

Палешкин Андрей Вячеславович, ассистент; Московский авиационный институт (государственный технический университет),Москва, Волоколамское шоссе, д.4, А-80, ГСП-3 125993, тел:499195 9172, e-mail: paleshkin@mail.ru.