

УДК 536.3:629.78

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК НА ПОВЕРХНОСТЬ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА В ИМИТАТОРЕ С СЕТЧАТЫМИ МОДУЛЯМИ

© 2022 г. А. В. Колесников<sup>1</sup>, А. В. Палешкин<sup>1</sup> \*, П. Ф. Пронина<sup>1</sup>, Е. В. Шеметова<sup>2</sup>, \*\*

<sup>1</sup>Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

<sup>2</sup>АО «НПО им. С.А. Лавочкина», Химки, Россия

\*E-mail: [paleshkin@mai.ru](mailto:paleshkin@mai.ru)

\*\*E-mail: [elena\\_shemetova08@mail.ru](mailto:elena_shemetova08@mail.ru)

Поступила в редакцию 10.11.2020 г.

После доработки 14.09.2021 г.

Принята к публикации 28.09.2021 г.

Представлены результаты исследований, связанных с проблемой создания инфракрасного имитатора многомодульного типа для моделирования тепловых нагрузок на поверхность космических аппаратов при их тепловакуумной обработке. Показано, что такой имитатор может быть создан с использованием в качестве модулей сетчатых излучателей, применяемых при проведении автономных тепловакуумных испытаний отдельных элементов космического аппарата с преимущественно плоскими внешними поверхностями. При этом возникает задача управления многомодульным имитатором, заключающаяся в необходимости определения такого характера распределения электрической мощности, подводимой к отдельным модулям, при котором расчетные внешние тепловые нагрузки на поверхность испытуемого объекта воспроизводились бы с максимально возможной для рассматриваемой имитационной системы точностью. Данная задача решается как обратная задача теории управления тепловыми процессами. Результаты вычислительных экспериментов свидетельствуют о возможности достижения высокой точности моделирования внешних тепловых нагрузок на космические аппараты с невогнутой формой наружной поверхности.

DOI: 10.31857/S0040364422020260

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время подходы к наземной обработке космической техники претерпели существенные изменения по сравнению с теми, которые декларировались в первые десятилетия развития практической космонавтики, когда основное внимание уделялось решению приоритетных задач, определяющих технический и научный уровень стран-разработчиков новой техники, в том числе и космической. На этом этапе экспериментальные установки создавались, исходя из критерия максимально возможного приближения имитируемых внешних условий эксплуатации разрабатываемых систем аэрокосмического назначения к реальным. При этом стоимость достижения данного эффекта являлась вторичным фактором.

Однако, столкнувшись с трудностями практической реализации концепции наземной экспериментальной обработки космической техники в условиях, максимально приближенных к натурным, создатели космической техники все большее внимание стали уделять разработке приближенных методов физического моделирования внешних тепловых нагрузок на поверхность космических аппа-

ратов (КА) и разработке методического и программного обеспечения управления энергетическими характеристиками технических средств, реализующих эти методы.

В качестве таких приближенных средств моделирования используются упрощенные излучающие системы, различные по конструкции и способу подвода энергии [1–5], но с одной общей особенностью – основная энергия испускаемого ими излучения сосредоточена в средней и дальней инфракрасных полосах спектра с длиной волны излучения, превышающей 3 мкм, где спектральная поглощательная способность большинства наружных покрытий КА слабо зависит от длины волны падающего излучения. В этом заключается основное преимущество инфракрасных имитаторов перед другими. Практическое же использование таких имитаторов сопряжено с необходимостью преодоления больших трудностей, связанных с управлением их энергетическими режимами эксплуатации. Основная трудность заключается в выборе таких режимов, при которых обеспечивалась бы максимально возможная точность моделирования заданных тепловых нагрузок, разумеется, в рамках принципиальных возможностей рассмат-

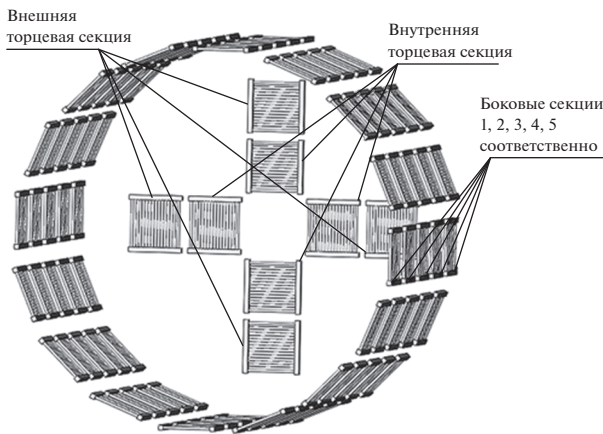


Рис. 1. Геометрическая модель имитатора (представлена без каркаса).

риваемой излучающей системы. Данные сложности обусловлены тем, что такие имитаторы не воспроизводят параметры поля излучения источников, тепловое воздействие которых на поверхность КА требуется в процессе испытаний. С их помощью воспроизводятся лишь расчетные значения внешних тепловых нагрузок, источником которых могут быть Солнце, тепловое излучение планет, их спутников, а также тепловое влияние частей КА, не вошедших в состав испытываемого объекта, например, по причине ограниченности размеров экспериментальной установки.

При проведении автономных тепловых испытаний частей КА с плоскими наружными поверхностями расчетные внешние тепловые нагрузки часто воспроизводятся с помощью так называемых сетчатых излучателей. Такие излучатели конструктивно выполняются в виде тонких параллельно расположенных токопроводящих проводов (чаще всего из нихрома), смонтированных на рамке из неэлектропроводного материала. Сетчатые излучатели имитатора устанавливаются в непосредственной близости от тех участков поверхности испытываемого объекта, на которые они должны воспроизводить расчетные внешние тепловые нагрузки.

Обладая рядом достоинств, например, такими как простота в изготовлении и эксплуатации, незначительное экранирование облучаемой поверхности, сетчатые излучатели в то же время имеют серьезный недостаток, чрезвычайно ограничивающий область их применения: каждый излучатель должен участвовать в облучении лишь той поверхности, в непосредственной близости от которой находится. Пересечение областей лучистого воздействия излучателей приводит к появлению погрешностей моделирования облученности испытываемого объекта с неплоской наружной поверхностью. В связи с этим актуальной является за-

дача создания имитатора внешних тепловых нагрузок на основе совокупности сетчатых излучателей, установленных вокруг испытываемого объекта на существенном от него расстоянии с тем, чтобы каждый модуль мог участвовать в облучении различных по ориентации и расположению тепловоспринимающих элементов испытываемого объекта.

Для создания такого имитатора необходимо рассмотреть, по крайней мере, следующие задачи, которые и решаются в настоящей работе:

- 1) выявить среди известных оптимальный методический подход и алгоритм расчета локальных угловых коэффициентов между тепловоспринимающими элементами испытываемого объекта и элементами сетчатых модулей имитатора (тонкими проводами);
- 2) установить зависимость плотности падающего на элемент теплового потока от подводимой к сетчатому модулю электрической мощности и его геометрических параметров;
- 3) выявить оптимальный в отношении точности воспроизведения заданных внешних тепловых нагрузок закон распределения подводимой к модулям электрической мощности.

#### МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ЛОКАЛЬНЫХ УГЛОВЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ

На рис. 1 изображен имитатор цилиндрической формы с однотипными сетчатыми излучателями (модулями), расположенными на боковой и торцевых ажурных, но достаточно жестких поверхностях.

Для упрощения вводится предположение о том, что сетчатый излучатель рассматривается как совокупность параллельно расположенных и параллельно запитываемых электрическим током одинаковых по длине проводов длиной  $l$  и диаметром  $d$ . Такое допущение можно принять в силу того, что в реальных сетчатых излучателях  $l \gg \Delta b$ , где  $\Delta b$  – шаг между проводами. Число проводов в модуле принимается равным  $N$ . Чтобы в модуле была центральная нить, число  $N$  должно быть нечетным. Середина центральной нити считается центральной точкой модуля. Предполагается, что на боковой поверхности цилиндрической части каркаса имитатора модули располагаются так, что их нити параллельны образующим прямым каркаса имитатора, а центральные нити лежат на самом каркасе. У торцевых модулей центральные точки размещаются на концентрических окружностях разного диаметра, но с одинаковым угловым шагом.

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

длиной  $l$ ) этого модуля в связанной с каркасом имитатора системе координат имеет следующие координаты:

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

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

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

Локальный угловой коэффициент  $\varphi_{di-j}$  между тепловоспринимающим элементом  $dF_i$  испытуемого объекта и  $j$ -м сетчатым модулем имитатора будет равен сумме локальных угловых коэффициентов между площадкой  $dF_i$  и всеми  $N$  проводами  $j$ -го модуля:

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

Апробированы два метода расчета коэффициента  $\varphi_{di-j}$  для сетчатых нагревателей [5–7]. Первый из них основан на аппроксимации короткого по длине участка поверхности излучающей нити поверхностью многогранника с треугольными гранями, другой на замене данного участка цилиндрической излучающей нити плоским излучателем с изменяющейся в зависимости от расположения тепловоспринимающего элемента ориентацией. Результаты сопоставления свидетельствуют о предпочтительности второго подхода. В основе замены лежит то обстоятельство, что в направлении любого элемента тепловоспринимающей поверхности достаточно короткий элемент излучающей нити, имеющей круглое сечение, испускает излучение практически как плоский элемент  $dF_j$ . Ширина такого элемента равна диаметру нити  $d$ , а нормаль лежит в плоскости  $\Omega$ , проходящей через ось нити и вектор  $\mathbf{p}_{dj-di}$  с началом в центральной точке этого плоского элемента и концом в центральной точке элемента  $dF_i$  тепловоспринимающей поверхности. Если, например,  $d/\rho = 0.01$ , то угловой диаметр излучающего элемента не превышает  $0.29^\circ$ , т.е. лучи, исходящие от него, можно считать параллельными.

#### ПЛОТНОСТЬ ТЕПЛОвого ПОТОКА, ПАДАЮЩЕГО НА ЭЛЕМЕНТЫ ИСПЫТУЕМОГО ОБЪЕКТА

Подводимая к сетчатому модулю электрическая мощность  $W_j$  за счет излучения его проводов

рассеивается в окружающее пространство. Интенсивность  $I$  уходящего с поверхности проводов излучения при диффузном характере их излучения и при степени черноты их поверхности  $\epsilon$  может быть представлена в виде  $I = \epsilon I^0$ , где  $I^0$  – интенсивность (яркость) излучения абсолютно черного тела с температурой, равной температуре провода.

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

$$q_i = \epsilon \pi I_j \varphi_{i-j}, \quad (2)$$

где  $\varphi_{i-j}$  – локальный угловой коэффициент  $i$ -го тепловоспринимающего элемента и  $j$ -го модуля, при этом  $\varphi_{i-j} = \sum_{k=1}^N \varphi_{i-k}$ . Здесь  $\varphi_{i-k}$  – угловой коэффициент между  $i$ -м тепловоспринимающим элементом и  $k$ -й нитью модуля.

С учетом того, что  $W_j$  – мощность, подводимая к  $j$ -му модулю, запишем

$$W_j = \epsilon \pi I_j \pi d N. \quad (3)$$

Тогда выражение для  $q_i$  примет другой, более удобный для последующего решения задачи вид:

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

Используя соотношения (2) и (3), можно выразить  $I_j$  через  $W_j$ . Это позволит для оптимизации режима работы имитатора с сетчатыми модулями использовать те же методические подходы, что и для имитаторов модульного типа с линейчатыми или условно точечными излучателями.

#### ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА РАБОТЫ ИМИТАТОРА

Задача определения оптимального в отношении точности воспроизведения заданных внеш-

них тепловых нагрузок закона распределения подводимой к модулям электрической мощности решается как одна из обратных задач [8, 9] теории управления тепловыми процессами в следующей постановке. Пусть  $\mathbf{q}^0 = (q_1^0, q_2^0, q_3^0, \dots, q_n^0)$  – вектор заданных значений плотности теплового потока в определенных точках поверхности испытуемого объекта, а  $\mathbf{W}^0 = (W_1, W_2, \dots, W_m)$  – вектор управления. Координаты данного вектора представляют собой упорядоченную совокупность значений электрической мощности, подводимой к модулям сетчатого имитатора.

Вектор  $\mathbf{W}^0$  выбирается из условия определенной согласованности вектора  $\mathbf{q}^0$  с  $\mathbf{q} = (q_1, q_2, q_3, \dots, q_n)$  значений плотности тепловых потоков, поглощаемых тепловоспринимающими элементами испытуемого объекта в условиях облучения его модулями рассматриваемого имитатора [7, 10]. При этом  $q_i = \sum_{j=1}^m \frac{W_j \Phi_{di-j}}{\pi d l N}$ .

В качестве меры отклонения вектора  $\mathbf{q}_i$  от вектора  $\mathbf{q}_i^0$  выбирается среднеквадратичная невязка

$$\psi(W_1, W_2, \dots, W_m) = \sum_{i=1}^n \left( \sum_{j=1}^m \frac{W_j \Phi_{di-j}}{\pi d l N} - q_i^0 \right)^2.$$

Решаемая задача сводится к минимизации функции  $\psi(W^0)$  при следующих естественных физических ограничениях на искомые величины  $W_j$ :  $W_j \geq 0$ ,  $W_j \leq W_{\max}$  при любых  $j \in [1; m]$ . Для оптимизации вектора  $\mathbf{W}^0$  используется итерационный алгоритм:  $W_0^{(k+1)} = W_0^{(k)} + \Delta W_0^{(k)}$ , где надстрочный индекс  $k$  – номер приближения. Начальное приближение искомого вектора можно задавать в значительной степени произвольно. В качестве приращения  $\Delta W_0^k$  при переходе к следующему приближению используется вектор  $\Delta \mathbf{W}_0^k = -\beta^{(k)} \cdot \mathbf{I}^{(k)}$ , где  $\mathbf{I}^{(k)}$  – векторная величина, определяющая направление спуска, т.е. направление перехода от вектора  $\mathbf{W}_0^{(k)}$  к вектору  $\mathbf{W}_0^{(k+1)}$ , а  $\beta^{(k)}$  – скалярная величина, характеризующая длину шага вдоль этого направления (глубину спуска). В данной работе направление спуска определялось методом скорейшего спуска, т.е. определялось направлением, противоположным градиенту функционала  $\psi(W_0)$  (противоположным вектору  $\psi'(W_0) = (\partial\psi/\partial W_1; \partial\psi/\partial W_2; \dots, \partial\psi/\partial W_m)$ ).

Глубина спуска  $\beta^{(k)}$  рассчитывалась численно с использованием итерационного алгоритма, который в данном случае реализуется следующим об-

разом. В качестве нулевого приближения значения  $\beta^{(k)}$  принимается  $\beta^{(k)} = 0$ . Малый шаг  $\Delta\beta^{(k)}$  изменения величины  $\beta^{(k)}$  задается, например, равным  $0.01 I^{(k)}$ . Тогда первое приближение вектора  $\Delta \mathbf{W}_0^k$  равно  $-\Delta\beta^{(k)}$ . Далее осуществляется расчет целевой функции при полученном первом приближении приращения вектора  $\mathbf{W}_0^{(k)}$ . Если полученное значение целевой функции окажется выше предыдущего, то после увеличения  $\beta^{(k)}$  на  $\Delta\beta^{(k)}$  вычисляется следующее приближение вектора  $\mathbf{W}_0^{(k)}$  и снова определяется значение целевой функции  $\psi(W_0)$ . Полученное значение сравнивается с предыдущим. Итерационный процесс прекращается тогда, когда последующее значение целевой функции окажется больше предыдущего. Это предыдущее значение и будет считаться минимальным при выбранном направлении спуска. Значение  $\beta^{(k)}$ , при котором достигается минимум  $\psi(W_0)$ , и является оптимальной глубиной спуска при переходе от вектора  $\mathbf{W}_0^{(k)}$  к вектору  $\mathbf{W}_0^{(k+1)}$ .

После вычисления  $(k + 1)$  приближения вектора  $\mathbf{W}_0^{(k+1)}$  определяется следующее приближение. На каждой итерации значение вектора  $\mathbf{W}^0$  корректируется в связи с необходимостью выполнения условий по ограничению этого вектора. Итерационный процесс прекращается, как только наметится тенденция к увеличению целевой функции.

Разработанный и представленный в данной статье метод моделирования тепловых нагрузок на поверхность КА в имитаторе с блочными сетчатыми излучателями реализован в виде многоблочной компьютерной программы и используется в вычислительных экспериментах для исследования возможностей данной имитационной системы в отношении точности моделирования внешних тепловых нагрузок на объекты с разной формой внешней поверхности.

### ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

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

На боковой поверхности имитатора сетчатые модули установлены в пяти равноотстоящих друг от друга секциях – по 16 модулей в каждом сечении, а на торцевых панелях – по восемь модулей на каждой.

Требуется определить такое распределение подводимой к модулям имитатора электрической мощности, при котором достигается максимальная точность моделирования заданной внешней тепловой нагрузки на поверхность испытуемого объекта с определенными относительными раз-

мерами. В качестве моделируемой внешней тепловой нагрузки рассматривалась нагрузка, соответствующая нахождению объекта над поверхностью Земли на высоте 300 км в подсолнечной точке (зенитный угол Солнца равен  $0^\circ$ ). Продольная ось  $Oz$  объекта располагалась параллельно поверхности Земли, а ось  $Ox$  направлена к центру Земли. При этом ось  $Ox$  направлена на Солнце. Сферическое альbedo Земли  $a_{сф}$  принималось равным 0.35, а величина солнечной постоянной  $S = 1400 \text{ Вт/м}^2$ .

Расчет плотности внешних тепловых потоков, падающих на элементы цилиндрического объекта, осуществлялся по методике, изложенной в работе [11].

Для решения рассматриваемой задачи необходимо задать геометрические модели имитатора и испытываемого объекта. Эти модели должны быть полными в той мере, чтобы можно было определить величины локальных угловых коэффициентов между тепловоспринимающими элементами испытываемого объекта и модулями имитатора.

К имеющимся обозначениям вводятся следующие дополнительные обозначения:  $D$  – диаметр имитатора;  $L$  – его длина;  $d_0$ ,  $l_0$  – соответственно диаметр и длина испытываемого объекта. Размеры объекта и длина имитатора относятся к диаметру имитатора.

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

Расположение центральных точек торцевых модулей задается в полярных координатах на торцевых плоскостях имитатора. Длина каждого модуля равна длине провода  $l$ . Ширина модуля  $b = (N - 1)\Delta b$ .

В рассматриваемой модельной задаче геометрическим параметрам имитатора и испытываемого объекта присваиваются следующие значения:  $D = 3 \text{ м}$ ,  $L/D = 1.5$ ,  $l_0/d_0 = 1.5$ ,  $d_0/D = 0.4$ ,  $d = 10^{-3} \text{ м}$ ,  $N = 11$ ,  $l = 0.3 \text{ м}$ ,  $\Delta b = 10^{-2} \text{ м}$ ,  $b = 0.1 \text{ м}$ .

**Геометрическая модель испытываемого объекта.** Для расчета лучистого теплообмена испытываемого объекта в имитаторе необходимо знать координаты центральных точек элементов поверхности объекта, ориентацию их нормалей, площади поверхности каждого элемента. В связи с этим целесообразно осуществить аппроксимацию поверхности исследуемого объекта многогранной поверхностью с мелкими гранями. Для этого на

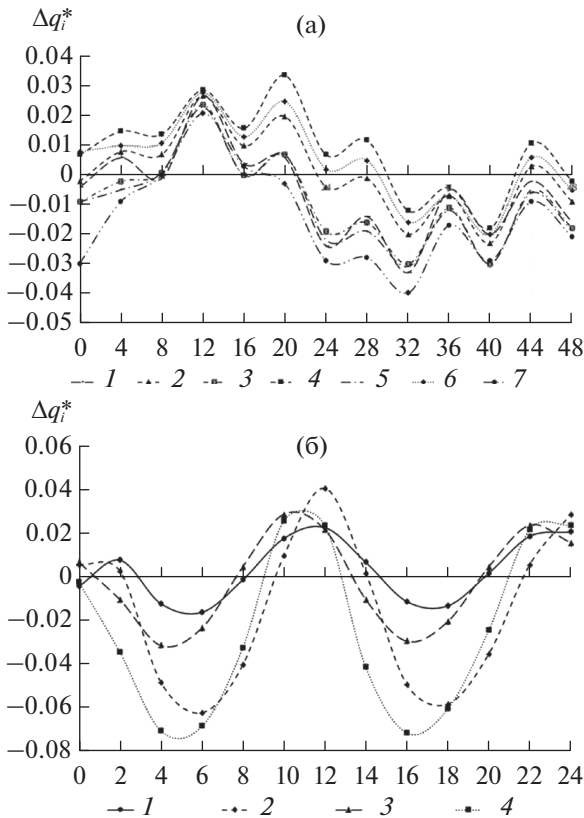
цилиндрической поверхности в связанной с испытываемым объектом системе координат задаются цилиндрические координаты большого числа точек. Затем осуществляется аппроксимация этой поверхности многогранной поверхностью с треугольными гранями и определяются ориентации нормалей, координаты центральных точек и площади каждой грани. Центральные точки треугольных граней определялись как точки пересечения их медиан. Данный подход к заданию геометрической модели поверхности испытываемого объекта описан в статье [6] и реализован в данной работе в виде компьютерной программы. В рассматриваемой модельной задаче боковая поверхность испытываемого объекта аппроксимировалась поверхностью многогранника с 912 треугольными гранями, находящимися в 19 поясах с 48 гранями в каждом поясе. Пояса образованы 20 поперечными сечениями цилиндрической поверхности, следующих друг за другом с одинаковым шагом  $\Delta z = l_0/20$ . Аппликата первого сечения равна нулю, последнего –  $l_0$ .

Разбиение торцевых поверхностей цилиндра на мелкие площадки осуществляется с помощью системы окружностей с радиусами  $R_j$ , изменяющимися от 0 до  $d/2$  с шагом  $dR$ , и прямых, проходящих через центр круга под углом  $\gamma$  по отношению к оси  $Ox$  с угловым шагом  $d\gamma$ . В этом случае координаты центральных точек площадок  $dF_i$  можно представить в виде  $x_i = (R_i - dR/2)\cos(\gamma - d\gamma/2)$ ,  $y_i = (R_i - dR/2)\sin(\gamma - d\gamma/2)$ ,  $z_i = 0$  – для нижнего торца и  $z_i = -1$  – для верхнего. Выражение для площадей торцевых элементарных площадок деления при принятых обозначениях имеет вид

$$dF_i = (R_i^2 - (R_i - dR/2)d\gamma/4).$$

Всего на поверхности объекта выделялось 1872 тепловоспринимающих элемента (элементарные площадки). В качестве радиационно-оптических характеристик поверхности объекта, характеризующих коэффициентом поглощения  $A_S$  поверхности по отношению к падающему солнечному излучению и степенью черноты  $\epsilon$ , принимались характеристики широко применяемой в космической технике облицовочной арамидной желтой ткани, у которой  $A_S \approx 0.29$ , а  $\epsilon \approx 0.55$ .

**Результаты расчета.** Полученные в результате решения задачи абсолютные размерные погрешности  $\Delta q_i$  ( $i \in [1, n_{\max}]$ ) моделирования расчетных значений тепловых нагрузок относились к характерной  $q_{\text{хар}}$  для данной задачи величине, в качестве которой принималась максимальная локальная плотность поглощаемого поверхностью испытываемого объекта потока излучения, исходящего от



**Рис. 2.** Безразмерные погрешности моделирования расчетных тепловых нагрузок в точках, расположенных в определенных поясах сечений поверхности цилиндрического испытываемого объекта в имитаторе с блочными сетчатыми излучателями: (а) – боковая поверхность: 1 – первый пояс, 2 – четвертый, 3 – седьмой, 4 – десятый, 5 – 13-й, 6 – 16-й, 7 – 19-й; (б) – торцевая поверхность: 1 – первый пояс, 2 – седьмой, 3 – 13-й, 4 – 19-й.

Солнца и Земли. Эта величина оказалась равной  $403 \text{ Вт/м}^2$ . В статье, следовательно, анализировались безразмерные локальные погрешности  $\Delta q_i^* = \Delta q_i / q_{\text{хар}}$ .

Погрешности на графиках рис. 2 представлены не для всех элементов испытываемого объекта, а лишь для нескольких их совокупностей, сгруппированных следующим способом: элементы боковой (цилиндрической) поверхности сгруппированы по поясам, которые образованы соседними поперечными сечениями поверхности объекта. Номера поясов на графиках обозначены символом  $P_{\text{бок}}$ . Группы элементов торцевых поверхностей образованы соседними окружностями, с помощью которых торцевая поверхность (круг) делится на отдельные элементы. Погрешности моделирования внешних тепловых нагрузок для левой и правой торцевых частей объекта отличаются незначительно благодаря симметричному расположению объекта относительно имитатора. Поэтому погрешности моделирования тепловых нагрузок на торцевые поверхности в работе представлены только для одного торца (рис. 2б). При этом номера поясов на графиках обозначены символом  $P_{\text{тор}}$ , а номера тепловоспринимающих элементов в каждом поясе приводятся на графиках по оси абсцисс.

Значения электрических мощностей, подводимых к модулям имитатора и температуры проводов, представлены в табл. 1, 2.

**Таблица 1.** Величины  $W_j$  [Вт] электрических мощностей (слева), подводимых к боковым модулям имитатора, и температуры  $T_j$  [К] проводов боковых модулей (справа)

№ модуля (сетки) в секции	№№ боковых секций имитатора				
	1	2	3	4	5
1	283/917	267/903	297/928	281/915	387/991
2	212/853	75/657	91/691	54/606	118/736
3	247/886	256/894	274/909	268/904	328/951
4	48/588	7/367	9/384	0/0	17/451
5	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
6	303/933	242/881	266/903	236/876	336/957
7	323/947	215/856	244/883	215/856	312/939
8	435/1021	362/975	380/987	345/963	454/1031
9	424/1014	339/959	365/977	343/962	458/1034
10	395/996	252/890	291/923	238/878	376/984
11	348/965	307/935	322/947	309/937	379/986
12	101/709	59/620	70/646	57/614	95/699
13	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
14	197/8370	134/760	152/785	134/761	185/824
15	220/860	167/803	194/835	169/806	261/899
16	224/865	165/801	161/796	150/782	164/800

**Таблица 2.** Величины  $W_j$  [Вт] электрических мощностей (слева), подводимых к торцевым модулям имитатора, и температуры  $T_j$  [К] проводов торцевых модулей (справа)

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

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

2. Представленный в работе метод моделирования тепловых нагрузок и его реализация в виде вычислительного алгоритма могут быть использованы в любых имитаторах модульного типа с условно трубчатыми излучателями, в частности в имитаторах воздействия конвективных тепловых потоков большой плотности на поверхность гипертонических летательных аппаратов.

Работа выполнена в рамках госзадания Министерства науки и высшего образования РФ (шифр FSFF-2020-0016).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Елисеев В.Н., Товстоног В.А. Теплообмен и тепловые испытания материалов и конструкций аэрокосмической техники при радиационном нагреве. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 396 с.
2. Cao Z., Pei Y., Liu S., Yin X. Infrared Lamp Array Design and Radiation Heat Flux Analysis // Recent Adv. Heat Transfer, Therm. Eng. Environ., Proc. IASME/WSEAS Int. Conf. Heat Transfer, Therm. Eng. Environ. (HTE'09). 2009. P. 96.
3. Wang Jing, Liu Shouwen, Pei Yifei. Infrared Lamp Array Simulation Technology Used During Satellite Thermal Testing // Int. J. Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic, and Manufacturing Engineering. 2010. V. 4. № 9. P. 905. <https://publications.waset.org/73/pdf>
4. Добрица Д.Б., Ушакова А.А., Шабарчин А.Ф., Яценко Б.Ю. Моделирование внешних тепловых воздействий от инфракрасных источников излучения при испытаниях ракетно-космической техники в ВК-600/300 // Вестн. Самарск. ун-та. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2017. Т. 16. № 3. С. 27.
5. Колесников А.В., Палешкин А.В. Численный метод выбора энергетического режима работы сетчатых нагревателей // Тр. МАИ. 2010. № 39. <http://trudy-mai.ru>
6. Колесников А.В., Палешкин А.В., Сыздыков Ш.О. Методика расчета облученности элементов испытываемых объектов в ламповых имитаторах внешних тепловых нагрузок // Тепловые процессы в технике. 2017. Т. 9. № 6. С. 267.
7. Колесников А.В., Палешкин А.В., Сыздыков Ш.О. Моделирование внешних тепловых нагрузок на космический аппарат в термобарокамере // ИФЖ. 2019. Т. 92. № 4. С. 997.
8. Алифанов О.М. Обратные задачи теплообмена. М.: Машиностроение, 1988. 280 с.
9. Видулов А.Г., Ненарокомов А.В. Уточненное решение вариационной задачи идентификации математических моделей теплообмена с сосредоточенными параметрами // ТВТ. 2019. Т. 57. № 2. С. 234.
10. Колесников А.В., Палешкин А.В., Мамедова К.И. Методика выбора оптимального режима работы сетчатого нагревателя // Тепловые процессы в технике. 2015. Т. 7. № 1. С. 37.
11. Залетаев В.М., Капинос Ю.В., Сургучев О.В. Расчет теплообмена космического аппарата. М.: Машиностроение, 1979. 207 с.