

УДК 629.78.018

## **Оптимизация энергетического режима работы имитатора внешних тепловых нагрузок.**

Колесников А.В., Палешкин А.В.

### **Аннотация**

Излагается разработанный авторами методический подход и алгоритм решения задачи выбора режима работы имитатора внешних тепловых нагрузок, обеспечивающего максимальную в пределах возможности принятой схемы имитатора точность воспроизведения заданных тепловых нагрузок на поверхность испытуемого объекта. Иллюстрируется эффективность данного подхода на примере решения конкретных задач.

### **Ключевые слова**

Имитатор, оптимизация, тепловые нагрузки, космический аппарат.

### **Введение**

При проведении тепловакуумных, вакуумнотемпературных, электрических испытаниях космических аппаратов (КА), а также при термочностных испытаниях элементов конструкции летательных аппаратов различного назначения широко используются средства лучистого нагрева поверхности испытуемого объекта для имитации внешних тепловых нагрузок, источниками которых может быть поток прямого солнечного излучения, собственное и отраженное солнечное излучение планет, тепловые потоки, обусловленные взаимодействием поверхности летательного аппарата с потоком частиц атмосферного газа, а также собственное и отраженное излучение частей КА, не вошедших в состав испытываемого объекта, но оказывающих на него заметное лучистое тепловое воздействие.

Источники лучистого нагрева размещаются на некотором удалении от испытуемого объекта и выполняются в виде токопроводящих и нагреваемых электрическим током лент, стеклографитовых, например, полых керамических стержней с вмонтированными в них электронагревателями; галогенных кварцевых ламп накаливания - одиночных, расположенных в линию, блоками, в виде панелей; тонкостенных труб с наружными проволочными электронагревателями и т. д. [1,3,4]. То есть излучатели по принципу подвода энергии, геометрической форме, конструкции могут быть самыми различными. Часто они применяются в совокупности с отражателями и теплоизоляцией с целью повышения коэффициента полезного использования подводимой энергии.

Однако, какие бы источники лучистого теплового потока мы не применяли для воспроизведения внешних тепловых нагрузок, всегда возникает необходимость в определении такого распределения подводимой к излучателям энергии, при которых в экспериментах достигается максимальная возможная точность воспроизведения расчетных внешних тепловых нагрузок. В работах [3,5] излагается простой, но эффективный подход к решению задачи определения оптимального, в отмеченном смысле, энергетического режима работы имитатора. Подход основан на использовании общеизвестного метода наименьших квадратов [6] и заключается в следующем. Режим работы имитатора характеризуется совокупностью значений интенсивности излучения его элементов (модулей) в направлении своих нормалей - величинами  $J_j(0) \quad j = 1 \dots n$ , 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, 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 мощности, температурой его излучающих поверхностей. Это можно сделать с помощью специально организованного эксперимента, предшествующего проведению одного из штатных испытаний.

Для реализации этого подхода к решению 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 объекта испытаний может быть представлена в виде данных о координатах достаточно большого числа точек его наружной поверхности. Такого числа, чтобы наружную поверхность можно было заменить поверхностью многогранника, каждая грань которого представляет собой треугольник с вершинами в заданных соседних точках. Центр каждой грани условно считается элементарной площадкой. Под центрами граней понимаются точка пересечения медиан треугольников, составляющих грани. Зная координаты и нумерацию вершин треугольника нетрудно выявить ориентацию и координаты введенных в рассмотрение элементарных площадок.

Геометрическая модель имитатора внешних тепловых нагрузок представляется в виде данных о координатах и ориентации его излучателей.

Каждому из  $N$  тепловоспринимающих элементов (граней) испытываемого объекта 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 [3] выбирается минимум целевой функции  $\Psi$ , представляющей собой сумму квадратов “взвешенных” погрешностей  $\Delta q_i$  воспроизведения расчетных значений  $q_i^0$  внешних тепловых потоков к выделенным тепловоспринимающим элементам. Величина  $\Delta q_i$  равна разности между плотностью потока  $q_i$  излучения, поглощаемого  $i$ -ым элементом в условиях экспериментальной установки и заданным значением плотности теплового потока  $q_i^0$ , подводимого по расчетам к выделенным элементам в штатных условиях эксплуатации. При этом

$$q_i = \sum_{j=1}^n \pi \cdot A_{ij} \cdot \Phi(\bar{r}) \cdot \varphi_{di-j} \cdot J_j(0)$$

где  $A_{ij}$  - интегральная поглощательная способность  $i$ -го элемента по отношению к излучению  $j$ -го излучателя ;

$\varphi_{di-j}$  - локальный угловой коэффициент  $i$ -го элемента и  $j$ -го излучателя ;

$\Phi(\vec{r})$  - индикатриса излучения;  $\vec{r}$  - единичный вектор, направленный от  $j$ -го излучателя к  $i$ -му элементу;

$n$  - число излучателей.

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

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

Для определения оптимальных значений  $J_j(0)$  решается задача на экстремум функции  $\psi$  как функции  $n$  переменных  $J_j(0)$   $j=1, 2, \dots, n$ . Данный подход к выбору режима работы имитатора показал свою эффективность при разработке методического обеспечения тепловакуумных испытаний многих объектов в тепловакуумных установках, оснащенных имитаторами внешних тепловых нагрузок на основе условно линейчатых излучателей, выполненных в виде стеклографитовых токопроводящих лент. Однако, при разработке методического обеспечения тепловакуумной отработки ряда объектов обнаружили некоторые недостатки рассматриваемого подхода. Для некоторых испытуемых объектов важно обеспечить не только минимально возможные (в пределах возможности используемого имитатора), но и пренебрежимо малые погрешности воспроизведения среднеинтегральных внешних тепловых нагрузок на некоторые характерные поверхности испытуемого объекта, например, радиационные поверхности с аксиальными тепловыми трубами. В связи с этим возникла необходимость несколько изменить рекомендуемый в [3] подход к выбору оптимального режима работы имитатора, а именно, решать задачу оптимизации значений  $J_j(0)$  как задачу на условный экстремум целевой функции  $\psi(J_1(0), J_2(0), \dots, J_n(0))$  при наличии условия:

$$\sum_{i=m}^l \left( \sum_{j=1}^n \pi \cdot A_{ij} \cdot \varphi_{di-j} \cdot J_j - q_i^0 \right) = 0 \quad (2)$$

В этом случае функция Лагранжа имеет вид:

$$\Phi(J_1, J_2, \dots, J_n) = \sum_{i=1}^N b_i^2 \cdot \left( \sum_{j=1}^n \pi \cdot A_{ij} \cdot \varphi_{di-j} \cdot J_j - q_i^0 \right)^2 + \lambda \cdot \left( \sum_{i=m}^l \left( \sum_{j=1}^n \pi \cdot A_{ij} \cdot \varphi_{di-j} \cdot J_j - q_i^0 \right) \right) \quad (3),$$

где  $\lambda$  - множитель Лагранжа.

Дифференцируя функцию (3) по переменным  $J_1, J_2, \dots, J_n, \lambda$ , запишем необходимое условие экстремума функции  $\Psi$  при наличии требования (2):

$$\frac{\partial \Phi}{\partial J_k} = 0, \quad k = 1, 2, \dots, n$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \lambda} = 0,$$

где 
$$\frac{\partial \Phi}{\partial J_k} = \sum_{i=1}^N b_i^2 \cdot 2 \cdot \left( \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot J_j - q_i^0 \right) \cdot a_{ik} + \lambda \cdot \sum_{i=m}^1 a_{ik},$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \lambda} = \sum_{i=m}^1 \left( \sum_{j=1}^n (a_{ij} \cdot J_j - q_i^0) \right),$$

$$a_{ij} = \pi \cdot \Phi(\vec{r}) \cdot \varphi_{di-j} \cdot A_{ij},$$

$\Phi(\vec{r})$  - индикатриса излучения модуля,  $A_{ij}$  - поглощательная способность  $i$ -го тепловоспринимающего элемента по отношению к излучению  $j$ -го модуля.

В итоге получим систему линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных  $J_j$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ) и  $\lambda$ .

Если определитель системы отличен от 0, то решение этой системы определяет положение критической точки функции  $\Psi$  в неограниченной области значений  $J_j(0)$ .

Поскольку производные  $\frac{\partial \Psi}{\partial J_k}$  линейно зависят от  $J_k$  и возрастают с их увеличением

$$\left( \frac{\partial \Psi}{\partial J_k} = 2 \cdot [J_k(0) \sum_{i=1}^N b_i^2 \cdot a_{ik}^2 + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^N a_{ij} \cdot a_{ik} \cdot J_j(0) - \sum_{i=1}^N q_i] \right),$$

то в критической точке, следовательно, имеет место минимум  $\Psi$ . Однако следует заметить, что на искомые

величины  $J_j$  накладываются ограничения, вытекающего из их физического смысла:

$$J_j(0) \geq 0.$$

Принимая во внимание это условие, ограничивающее область значений  $J_j(0)$ , целесообразно воспользоваться для решения системы линейных уравнений и,

следовательно, нахождения условного минимума функции  $\Psi$  итерационным методом [6].

Заметим, что входящие в уравнения коэффициенты  $a_{ij}$  зависят от  $A_{ij}$ , которые в случае несерых тепловоспринимающих элементов сами являются функциями  $J_j(0)$ .  $A_{ij}$  зависит от характера распределения по  $\lambda$  спектральной поглотительной способности  $A_\lambda$  поверхности тепловоспринимающего элемента и от характера распределения по  $\lambda$  спектральной интенсивности излучателя. Для вычисления  $A_\lambda$  воспользуемся известным в теории теплообмена излучением соотношением [7]:

$$A_{ij} = \frac{\int_{\lambda=0}^{\infty} J_\lambda^0(\lambda, T_j) \cdot (\varepsilon_\lambda)_j \cdot (A_\lambda)_i \cdot d\lambda}{\int_{\lambda=0}^{\infty} J_\lambda^0(\lambda, T_j) \cdot (\varepsilon_\lambda)_j \cdot d\lambda},$$

$$J_\lambda^0 = \frac{2 \cdot C_1}{\lambda^5 \cdot (\exp(C_2 / \lambda \cdot T_j) - 1)},$$

где

$$C_1 \approx 0.595 \cdot 10^{-16} \text{ вт} \cdot \text{м}^2, \quad C_2 \approx 1.44 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{К}.$$

При известной зависимости  $A_\lambda = f(\lambda)$ , интегралы, входящие в выражение для  $A_{ij}$  можно определить численно.

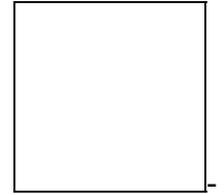
Задачу определения  $A_{ij}$  необходимо рассматривать в связи общей задачей определения оптимального режима работы имитатора. Сначала задача минимизации целевой функции  $\Psi$  решается с целью грубого определения  $J_j(0)$ , вводя предположение о независимости  $A_{ij}$  от  $J_j(0)$ . Первое приближение значений  $J_j(0)$  является основой для определения первого приближения  $A_{ij}$ . Потребное количество приближений зависит от степени нерегулярности спектральных радиационных характеристик излучателей и тепловоспринимающих элементов.

Входящую в выражение для коэффициента  $a_{ij}$  величину локального углового коэффициента ( $\varphi_{di-j}$ ) можно определить как угловой коэффициент между элементарными площадками, но при условии если между тепловоспринимающий элемент  $d_i$  не экранируется от излучения элемента  $d_j$  какими-то участками поверхности испытуемого объекта. Поэтому расчету углового коэффициента должна предшествовать процедура выявления возможного эффекта затенения.

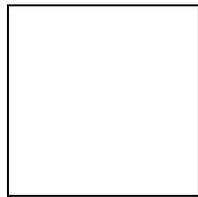
Вопрос о наличии или отсутствии экранирования решается следующим образом.

Определяются точки пересечения вектора  $\vec{P}_{di-dj}$  с плоскостями всех граней испытываемого

объекта, которые могут экранировать излучение, испускаемое элементом  $dj$



ого излучателя. При этом вектор  $\vec{P}_{di-dj}$  - вектор, имеющий начало в центральной точке



-ой грани, а конец - в центральной точке элемента  $dj$ . 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. Алгоритм решения задачи обнаружения взаимной затеняемости граней достаточно подробно излагается в работе [3].

Кратко охарактеризованный методический подход и алгоритм решения задачи оптимизации энергетического режима работы имитатора реализован в виде Фортран-программы, которая использовалась при подготовке методического обеспечения тепловакуумной отработки ряда конкретных объектов. Ниже в данной статье приводятся результаты решения модельных задач - задач оптимизации режима работы двух гипотетических имитаторов, которые воспроизводят заданные внешние тепловые нагрузки на три абстрактных испытываемых объекта.

Предполагалось, что первый имитатор выполнен в виде совокупности однотипных модулей, установленных на каркасе ферменной конструкции. Каркас имеет условную форму правильной 12-ти угольной призмы с полностью открытым верхним основанием и с плоской ферменной конструкцией нижнего основания. На боковой поверхности каркаса модули размещаются в 6 равноотстоящих друг от друга поясах по 12 модулей в каждом поясе.

Следовательно, на боковой поверхности каркаса размещается 72 модуля. Модули торцевой части имитатора располагаются вдоль касательных к двум окружностям с радиусами  $r_1$  и  $r_2$ , ( $r_1 > r_2$ ). Угловой шаг внешних торцевых модулей принимался равным  $45^\circ$ , а внутренних -  $90^\circ$ . В этом случае число внешних торцевых модулей равно 8, а

внутренних - 4, а общее число торцевых модулей - 12. Считалось, что высота призмы в 2 раза превышает диаметр окружности, вписанной в ее основание. В качестве испытуемого объекта рассматривалась внутренняя поверхность полусферы с диаметром, составляющим  $\frac{1}{2}$  от диаметра цилиндрической поверхности, на которой размещаются боковые модули имитатора. С помощью имитатора необходимо было с наибольшей точностью воспроизвести распределение величин плотности потока солнечного излучения, падающего на элементы внутренней поверхности полусферы при ориентации ее продольной оси на Солнце. Предполагалось, что полусфера располагается соосно с имитатором, ее входное сечение ориентировано на торцевые модули и совпадает с плоскостью верхнего сечения имитатора. Поверхность полусферы аппроксимировалась поверхностью многогранника с 432 треугольными гранями. Для аппроксимации задавались координаты 240 точек, расположенных в 10 равноотстоящих друг от друга поперечных сечениях по 24 точки в каждом сечении.

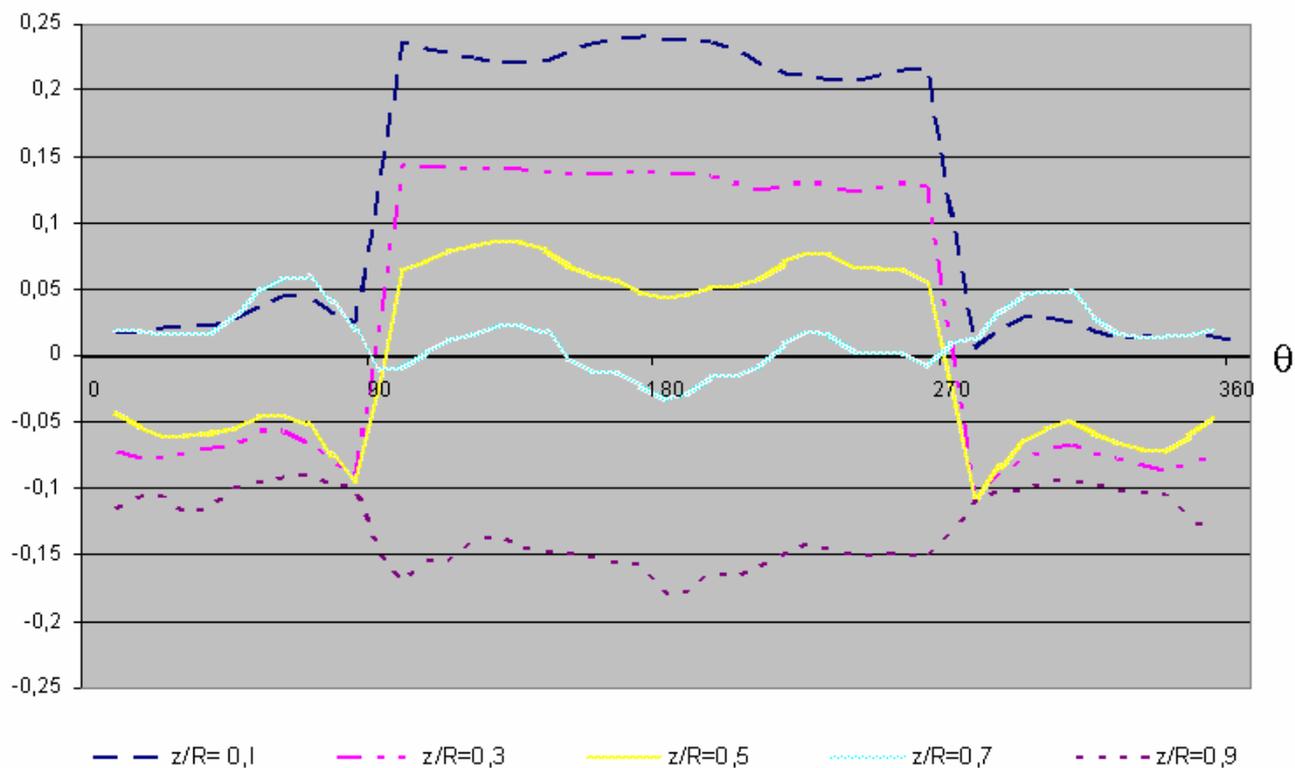


Рис. 1 Локальные погрешности воспроизведения воздействия потока солнечного излучения на элементы внутренней поверхности полусферы в имитаторе с условно точечными излучателями.

Результаты решения задачи, иллюстрируются на графиках рис.1, где приводятся локальные погрешности воспроизведения заданных тепловых потоков для элементов

внутренней поверхности полусферы, расположенных в 5 поперечных сечения, отстоящих от плоскости выходного сечения полости на относительных расстояниях  $\frac{z}{R} = \{0,1;0,3;0,5;0,7;0,9\}$ , где  $z$  отсчитывается от плоскости выходного сечения полости,  $R$  - радиус полусферы. В каждом сечении погрешности приводятся для 48 точек, равномерно расположенных по окружности. Абсолютные погрешности относились к характерной для данного случая величине, в качестве которой принималась величина солнечной постоянной  $S = 1400 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ . Локальные погрешности находятся в пределах  $[-0,23;0,25]$ , в то время как среднеинтегральные погрешности не превышают величину 0,012, а среднеквадратичные погрешности составляют 0,101.

В качестве второго имитатора рассматривался имитатор с условно линейчатыми излучателями, расположенными вдоль образующих поверхности кругового цилиндра. По высоте излучатели расположены в виде 6 поясов (рядов). В каждом ряду находятся 12 излучателей, размещаемых равномерно по окружности с угловым шагом  $15^\circ$ . Если относить все размеры имитатора и испытуемого объекта к диаметру  $D$  имитатора, то относительная высота  $\bar{H}$  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 с 20 поперечных сечениях по 24 точки в каждом сечении. В рассматриваемом случае имитатор должен был воспроизвести две ситуации внешнего теплового нагружения цилиндрической поверхности:

Поверхность подвергается только воздействию потока солнечного излучения, падающего на нее сбоку (перпендикулярно продольной оси).

Помимо потока прямого солнечного излучения поверхность подвергается воздействию потока собственного излучения Земли.

Предполагалось, что объект находится на расстоянии  $300 \text{ км}$  от поверхности Земли, а его продольная ось направлена на центр Земли.

Результаты расчета погрешностей воспроизведения внешних тепловых нагрузок для двух рассматриваемых ситуаций представлены на графиках рисунков 2 и 3. Погрешности приводятся для 5 приблизительно равноотстоящих друг от друга поперечных сечений  $z/h = \{0,0,2;0,4;0,6;0,8\}$ . В каждом сечении находятся внутренние точки 48 элементарных граней аппроксимирующей поверхности.

Как и в случае имитатора с условно точечными излучателями абсолютные погрешности относились к величине солнечной постоянной  $S$ .

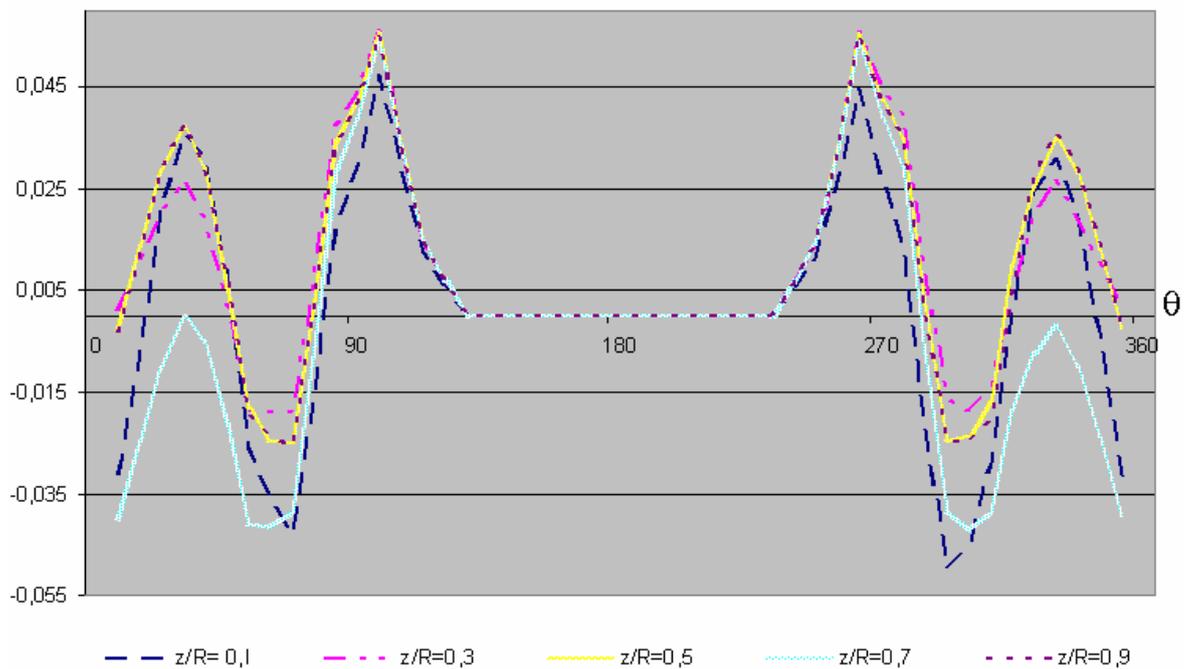


Рис. 2 Погрешности воспроизведения воздействия потока солнечного излучения на элементы цилиндрической поверхности в имитаторе с условно линейчатыми излучателями.

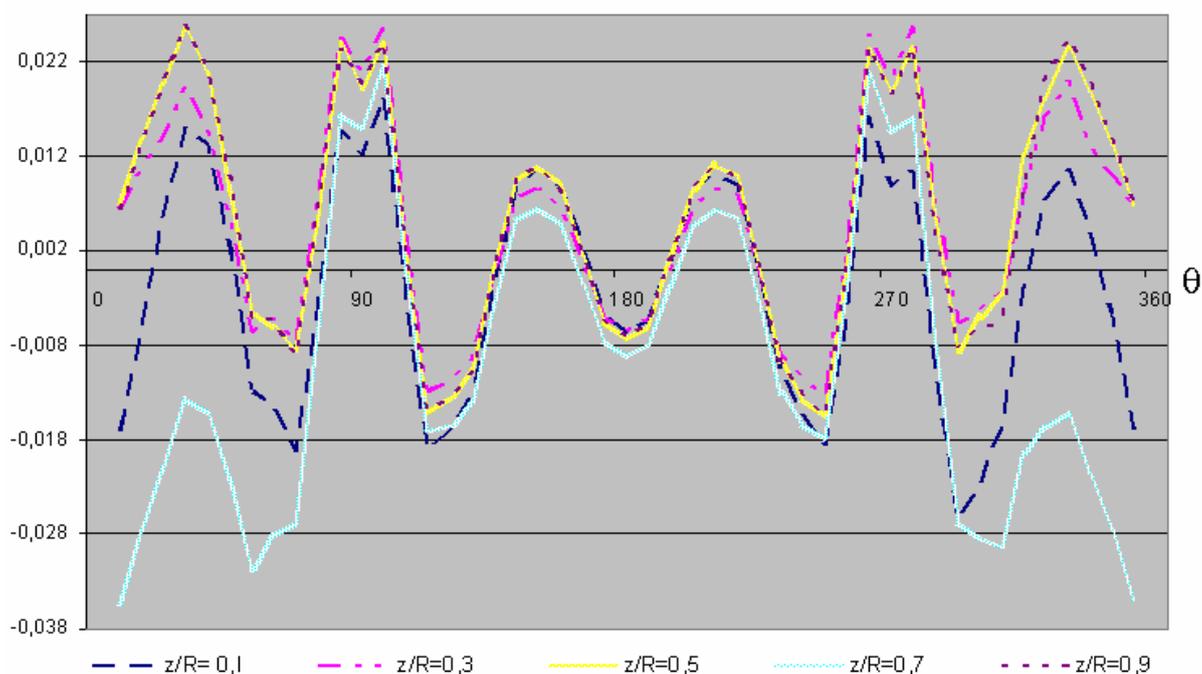


Рис. 3 Погрешности воспроизведения воздействия солнечного излучения и собственного излучения Земли на цилиндрическую поверхность в имитаторе с линейчатыми излучателями.

Из графиков следует, что для двух рассматриваемых случаев локальные погрешности отличаются несущественно. Среднеинтегральные погрешности для первого случая не превосходят величину 0,0053, а для второго - 0,0005. Среднеквадратичные погрешности для рассмотренных случаев составляют величины соответственно равные 0,0269 и 0,0195.

Приведенные результаты решения модельных задач свидетельствуют об эффективности рекомендуемого для использования методического подхода и алгоритма оптимизации режима работы имитаторов внешних тепловых нагрузок, выполненных в виде совокупности каких-либо излучателей, установленных вокруг испытуемого объекта на некотором от него расстоянии.

### Библиографический список

1. Андрейчук О.Б., Малахов Н.Н. Тепловые испытания космических аппаратов.-М.: Машиностроение, 1982,-143с.
2. Залетаев В.М., Капинос Ю.В., Сургучев О.В. Расчет теплообмена космического аппарата.-М.:Машиностроение, 1979, с.46-78.

3. Колесников А.В., Сербин В.И. Моделирование условий внешнего теплообмена космических аппаратов.-М.:”Информация –XXI век”,1997,- 170с.
4. 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.
5. 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.
6. Бронштейн И.Н.,Семендяев К.А.Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов.-13-е издание, исправленное.-М.:Наука . 1966.-544с.
7. Р. Зигель, Дж. Хауэлл. Теплообмен излучением. Перевод с англ. Под ред. Хрусталева Б.А. Издательство “Мир”, М. , 1975. 934 с.

### **Сведения об авторах**

Колесников Анатолий Васильевич, профессор, д.т.н, Московский авиационный институт (Государственный технический университет), тел. 84955755425

Палешкин Андрей Вячеславович, аспирант, Московский авиационный институт (Государственный технический университет), тел. 4991959172, [paleshkin.andrey@mail.ru](mailto:paleshkin.andrey@mail.ru)