

УДК 536.5

Использование масштабных моделей в наземных экспериментах, воспроизводящих теплообмен в условиях космического пространства

Н.П. Семена

Институт космических исследований РАН, Москва

E-mail: semena@iki.rssi.ru

Предлагается метод экспериментального исследования температурных режимов космических устройств с помощью их уменьшенных тепловых моделей, основанный на критериях подобия, сформированных исходя из математической узловой модели исследуемого объекта. Обычно из-за значительной стоимости тепловакуумные эксперименты с полноразмерным объектом имеют жесткие ограничения по времени. Однако на основании результатов такого ограниченного эксперимента могут быть уточнены параметры масштабной модели, основанной на узловой математической модели. Данная корректировка обеспечивает соответствие результатов полноразмерного и масштабного экспериментов. После этого масштабный тепловой эксперимент может дополнить полноразмерный эксперимент за счет исследования тех температурных режимов, которые не воспроизводятся экспериментально при полноразмерном эксперименте по причине ограниченных ресурсов. Предложенный метод позволит существенно расширить возможность получения достоверных экспериментальных данных о температурных режимах космических объектов без существенного увеличения затрат.

Ключевые слова: масштабное тепловое моделирование, теплообмен в космосе, термодинамические критерии подобия, узловая математическая модель.

Введение

Одним из основных условий сохранения работоспособности любого космического аппарата является поддержание его аппаратуры в достаточно узком температурном диапазоне. Высокую сложность этой задаче придает то, что теплообмен космического аппарата с окружающим пространством происходит в условиях высокого вакуума, экстремально низкой радиационной температуры космоса и достаточно интенсивных тепловых потоков от Солнца и планеты, то есть в условиях полностью отличных от земных. Дополнительную трудность создают ограничения по массе и энергоресурсам, присущие любым космическим аппаратам.

Для отработки системы обеспечения температурного режима космических объектов проводятся наземные тепловые эксперименты в условиях, имитирующих тепловые факторы космического пространства. Каждый подобный эксперимент с полноразмерным космическим аппаратом требует использования уникального оборудования и имеет чрезвычайно высокую стоимость [1]. По этой причине при данных экспериментах отсутствует возможность исследования всего многообразия тепловых режимов космического аппарата.

Воспроизводятся несколько ограниченных по продолжительности режимов, а остальные определяются на основании результатов математического моделирования, часто имеющих высокую погрешность. Поэтому необходим метод, который бы позволил повысить достоверность результатов моделирования без существенного увеличения используемых ресурсов.

В настоящей работе показано, что таким методом может быть экспериментальное исследование температурных режимов уменьшенных тепловых моделей, разработанных на базе математической узловой модели, параметры которой определены на основании обработки результатов полноразмерного эксперимента.

Примеры задач теплового масштабного моделирования

Возникающие при тепловых наземных экспериментах проблемы, оптимальным решением которых является масштабное тепловое моделирование, могут быть рассмотрены на примере тепловакуумных испытаний российского рентгеновского телескопа ART-XC, который должен быть запущен в составе международной обсерватории “Спектр-РГ” в точку либрации L2 в 2014 году [2]. Данный телескоп относится к средне-размерным космическим приборам. Он выполнен в виде усеченного конуса длиной 3 м с диаметрами торцов 0,5 и 0,7 м. Вес телескопа составляет 350 кг.

В декабре 2011 г. в вакуумной камере, оснащенной экранами, охлаждаемыми жидким азотом, проводились испытания этого объекта, в процессе которых воспроизводились несколько вариантов его теплового режима (см. рис. 1). При проведении испытаний проявились три основные проблемы.

Во-первых, из-за изначально установленных ограничений по времени эксперимента, значительной теплоемкости и низкого уровня теплообмена с окружающей средой через эффективно теплоизолированную поверхность объекта ни в одном из четырех этапов испытаний не удалось достичь стационарного температурного режима телескопа (см. рис. 1).

Во-вторых, температура ряда систем, определяющих работоспособность всего телескопа, в частности рентгеновских зеркал и звездного датчика, была на недопустимо низком уровне на всех этапах эксперимента.

В-третьих, в процессе эксперимента выявились значительные расхождения результатов математического моделирования и эксперимента. При этом используемый для моделирования метод конечных элементов не позволял полноценно скорректировать модель по результатам эксперимента [3].

Поскольку была выявлена недостоверность математической модели, то целесообразно было провести дополнительные экспериментальные исследования, однако повторные испытания полноразмерного телескопа не были предусмотрены из-за чрезвычайно высокой стоимости. Данное противоречие может быть устранено за счет использования для эксперимента масштабной модели.

Критерии подобия масштабной тепловой модели, основанные на узловой модели, сформированной по результатам эксперимента с полноразмерным объектом

Очевидно, что главным условием использования масштабной модели для поставленных в предыдущем разделе задач является полное соответствие ее температуры и температуры объекта при соответствии условий, создающих температурные режимы. Очевидно также, что достоверность масштабного моделирования чрезвычайно возрастает, если модель будет построена на основании результатов полномасштабного эксперимента.

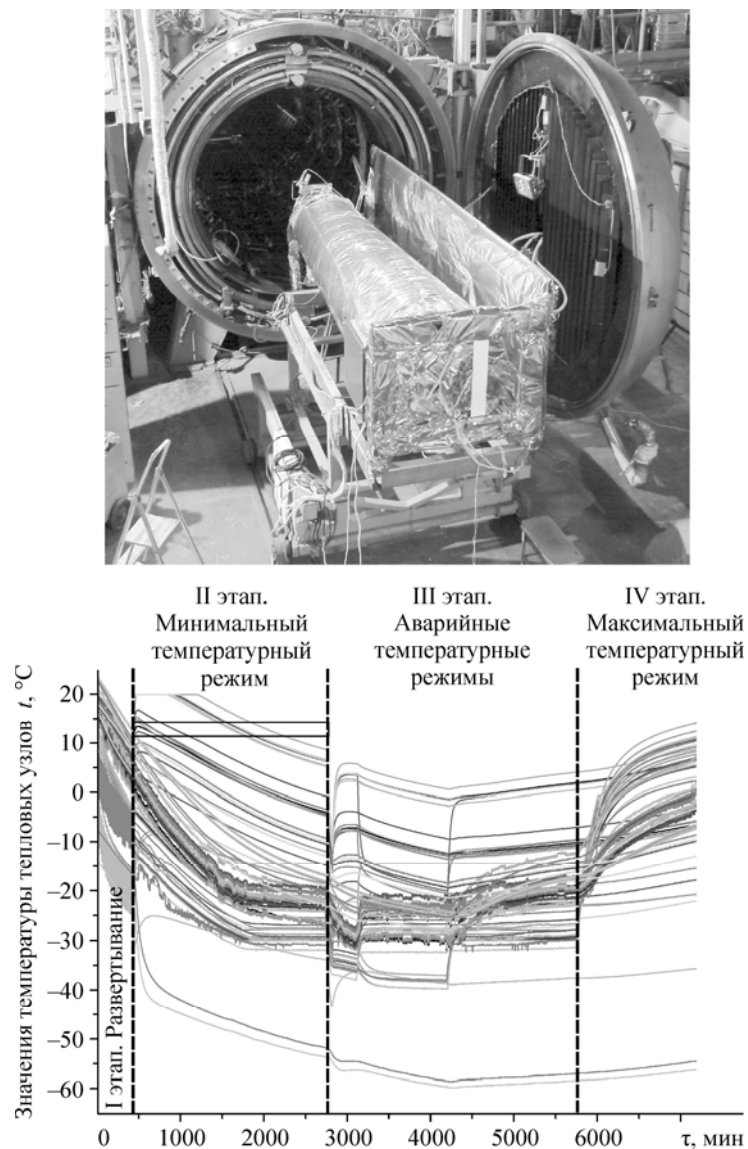


Рис. 1. Тепловая полноразмерная модель телескопа ART-XC перед установкой в тепловакуумную камеру и результаты эксперимента.

Обе эти проблемы могут быть решены с помощью узловой математической тепловой модели, практически не применяемой в последнее время. В основном для теплового математического моделирования используется конечно-элементная модель [3]. В ней трехмерная теплофизическая модель объекта разбивается на большое количество малых изотермических элементов простой формы, осуществляющих теплообмен с соседними элементами или с окружающей средой через внешние грани. Причиной распространённости модели данного типа является ее хорошая адаптируемость к современным системам трехмерного проектирования.

Однако конечно-элементную модель сложно корректировать по результатам эксперимента по причине того, что соответствие между расчетными и экспериментальными данными может быть получено за счет большого количества различных вариантов сочетаний параметров такой модели. При этом соответствующим действительности будет только один из этих вариантов. Данный вариант может быть выявлен при проведении

очень большого числа физических экспериментов, что невыполнимо по причине временных и финансовых ограничений.

Более подходящей для целей корректировки по результатам эксперимента является узловая модель. В ней реальный объект делится на ограниченное число условно изотермических узлов, в которых сосредоточена вся его теплоемкость. Теплообмен между узлами осуществляется через эффективные тепловые связи, проводимость которых определяется теплопроводностью конструкции между этими узлами. На рис. 2 представлена узловая и конечная элементная модель телескопа ART-XC.

Узловая модель представляет собой систему дифференциальных уравнений, каждое из которых описывает теплообмен одного теплового узла. Для i -го теплового узла объекта, находящегося в условиях космического пространства, это уравнение имеет вид [4]:

$$m_i C p_i \frac{dT_i}{d\tau} = Q_i + ((A s_i (E s_i + E s p_i) + \varepsilon 1_i \cdot E p_i) S 1_i + \sum_{j=1(j \neq i)}^N \frac{T_j - T_i}{R_{ij}} + \sum_{j=1}^N \varphi 2_{ij} \frac{1}{\varepsilon 2_i^{-1} + \varepsilon 2_j^{-1} - 1} \sigma (T_j^4 - T_i^4) S 2_i - \varphi_{s i} \cdot \varepsilon 1_i \cdot \sigma (T_i^4 - T_s^4) S 1_i, \quad (1)$$

где m_i , $C p_i$, T_i , Q_i — масса, удельная теплоемкость, температура и внутреннее тепловыделение i -го теплового узла, $S 1_i$, $A s_i$, $\varepsilon 1_i$ — площадь, коэффициент поглощения солнечного излучения, степень черноты — параметры поверхности i -го теплового узла, через которую происходит теплообмен с внешним пространством, $S 2_i$, $\varepsilon 2_i$ — площадь, степень черноты — параметры поверхности i -го теплового узла, через которую происходит теплообмен с другими тепловыми узлами, R_{ij} — тепловое сопротивление кондуктивной тепловой связи между i -м и j -м тепловыми узлами, $\varphi_{s i}$ — угловой коэффициент площади

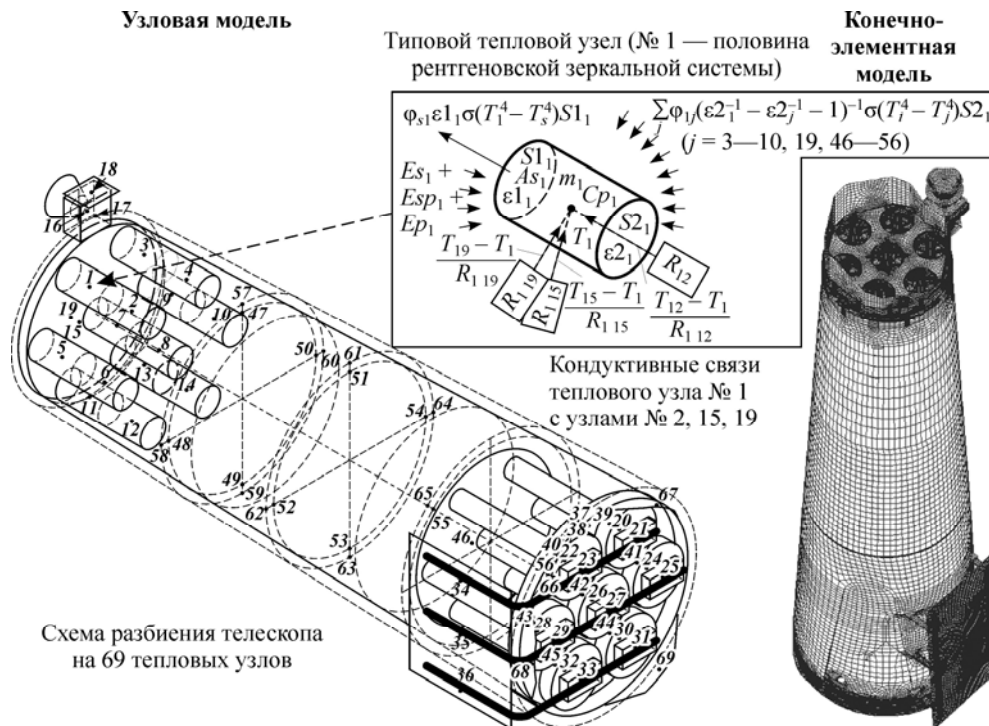


Рис. 2. Узловая и конечно-элементная модель космического телескопа ART-XC.

внешнего теплообмена ($S1_i$) i -го теплового узла по отношению к космическому пространству, φ_{ij} — угловой коэффициент площади внутреннего теплообмена ($S2_i$) i -го теплового узла по отношению к площади внутреннего теплообмена ($S2_j$) j -го теплового узла, Es_i , Esp_i , Ep_i — значения облученности внешними лучистыми потоками: прямым солнечным излучением, отраженным от планеты солнечным излучением и собственным излучением планеты площади внешнего теплообмена ($S1_i$) i -го теплового узла, T_s — радиационная температура космического пространства, τ — время, σ — постоянная Стефана–Больцмана.

При обработке результатов эксперимента узловая модель имеет следующие преимущества перед конечно-элементной:

- простота адаптации модели к реальному объекту испытания за счет установки датчиков температуры в местах, соответствующих тепловым узлам математической модели;

- простота коррекции параметров узловой модели по результатам эксперимента из-за использования в модели обобщенных эффективных параметров, при корректировке которых, в отличие от конечно-элементной модели, не требуется выбирать какую из составляющих этих параметров надо корректировать.

Узловая модель объекта эксперимента может быть целиком сформирована по результатам данного эксперимента. Для этого должна быть решена обратная задача, то есть из системы уравнений (1) необходимо найти величины $m_i \cdot Cp_i$, $S1_i$, $S2_i$, φ_{2ij} , φ_{sij} , ε_{1i} , ε_{2ij} , R_{ij} на основании известных величин $\frac{dT_i}{d\tau}$, T_i , T_j , Q_i , T_s .

Для этих целей при исследовании динамических тепловых режимов должны быть выбраны M квазилинейных участков изменения температур узлов объекта эксперимента. На рис. 3 представлен график реального изменения температур узлов телескопа ART-XC при проведении наземного теплового эксперимента в вакуумной камере, начало каждого участка соответствует своему моменту времени — τ_1 , τ_2 , ... τ_k , ... τ_M . Как видно из рисунка, каждый такой участок позволяет экспериментально определить числовые значения

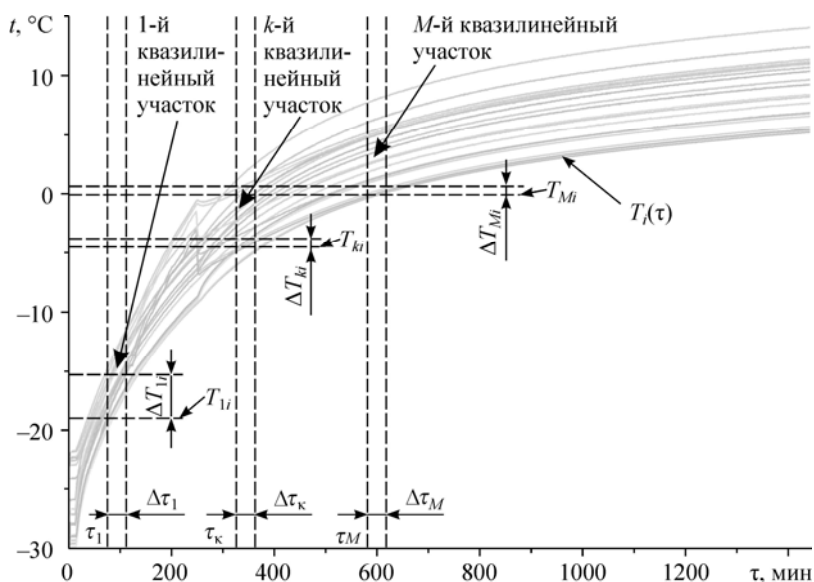


Рис. 3. Зависимости температуры тепловых узлов 20–33 телескопа от времени при переходном температурном режиме к максимальному уровню температур.

производных и уровней температур узлов математической модели для конкретного момента времени τ_k :

$$\left(\left(\frac{\Delta T_{k1}}{\Delta \tau_k}, \frac{\Delta T_{k2}}{\Delta \tau_k}, \dots, \frac{\Delta T_{ki}}{\Delta \tau_k}, \dots, \frac{\Delta T_{kN}}{\Delta \tau_k}, T_{k1}, T_{k2}, \dots, T_{ki}, \dots, T_{kN} \right) \right).$$

На основании этих данных может быть составлено M (для $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_k, \dots, \tau_M$) адаптированных для обработки результатов эксперимента систем уравнений, аналогичных системе (1). Для момента времени τ_k такая система будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} m_i C p_i \frac{\Delta T_{ki}}{\Delta \tau_k} &= Q_{ki} + \sum_{j=1(j \neq i)}^N \frac{T_{kj} - T_{ki}}{R_{ij}} + \\ \sum_{j=1}^N \varphi_{2ij} \frac{1}{\varepsilon 2_i^{-1} + \varepsilon 2_j^{-1} - 1} \sigma (T_{kj}^4 - T_{ki}^4) S 2_i - \\ \varphi_{si} \frac{1}{\varepsilon 1_i^{-1} + \varepsilon_s^{-1} - 1} \sigma (T_{ki}^4 - T_{ks}^4) S 1_i, \end{aligned}$$

где i изменяется в диапазоне от 1 до N , k – от 1 до M .

В этих системах величины $\Delta T_{ki}/\Delta \tau_k, T_{ki}, T_{kj}, Q_{ki}, \varepsilon_s, T_{ks}$ определяются путем прямых измерений или элементарной обработкой этих измерений.

Необходимо отметить, что при адаптации системы (1) для обработки результатов эксперимента были сделаны следующие допущения:

- $\frac{dT_{ki}}{d\tau_k} \approx \frac{\Delta T_{ki}}{\Delta \tau_k}$ — возможно за счет того, что при формировании систем уравнений выбраны квазилинейные участки изменения температуры;

- $As_i(\varepsilon_s + \varepsilon p_i) + \varepsilon 1_i \cdot E p_i = 0$ — соответствует условию проведения эксперимента, поскольку внутри вакуумной камеры на объект эксперимента не воздействуют лучистые потоки от внешних источников излучения, кроме учтенного в уравнениях теплового потока от стенки вакуумной камеры, определяемого ее температурой T_{ks} и степенью черноты ε_s ;

- отсутствует тепловой поток по опорам, на которых в вакуумной камере установлен объект эксперимента. Для реализации этого допущения необходимы специальные меры — использование опор с чрезвычайно высоким тепловым сопротивлением, либо применение охранных нагревателей, установленных на опорах и обеспечивающих нулевой градиент температуры по ним.

Вышеописанная процедура позволяет получить $N \cdot M$ уравнений при наличии $4 \cdot i \cdot (1+j)$ неизвестных. Поскольку при динамическом тепловом режиме может быть выделено практически неограниченное число квазилинейных участков M , то число полученных уравнений может заведомо превышать число неизвестных. Избыточные уравнения могут применяться для уточнения полученных решений: $m_i \cdot C p_i, S 1_i, S 2_i, \varphi_{2ij}, \varphi_{sij}, \varepsilon 1_i, \varepsilon 2_{ij}, R_{ij}$, неточность которых обусловлена погрешностью измерения физических величин: $\Delta T_{ki}, \Delta \tau_k, T_{ki}, T_{kj}, Q_{ki}, T_{ks}, \varepsilon_s$, используемых в системах уравнений, как известные величины.

Принцип разбиения объекта на ограниченное число тепловых узлов может быть использован для создания его уменьшенной модели, температура узлов которой будет эквивалентна температуре соответствующих узлов полноразмерного объекта. Такая модель должна иметь то же число тепловых узлов, что и полноразмерный объект. Если

эту модель разместить в имитирующей условия космического пространства вакуумной установке, то уравнение теплообмена для ее i -го теплового узла будет иметь следующий вид:

$$m'_i \cdot Cp'_i \frac{dT'_i}{d\tau} = Q'_i + Qa'_i + \frac{\varphi'_{si}}{(\varepsilon 1_i'^{-1} + \varepsilon_s'^{-1} - 1)} \sigma \cdot T_i'^4 S1'_i + \sum_{j=1(j \neq i)}^N \frac{1}{R'_{ij}} (T'_j - T'_i) + \sum_{j=1}^N \frac{\varphi 2'_{ij}}{(\varepsilon 2_i'^{-1} + \varepsilon 2_j'^{-1} - 1)} \sigma (T_j'^4 - T_i'^4) S2'_i - \frac{\varphi'_{si}}{(\varepsilon 1_i'^{-1} + \varepsilon_s'^{-1} - 1)} \sigma T_i'^4 \cdot S1'_i. \quad (2)$$

В данном уравнении используются параметры, аналогичные параметрам уравнения (1). При этом верхний индекс ' означает, что параметры относятся к модели.

Основные различия уравнений (1) и (2) возникли из-за применения упрощенного способа моделирования поглощенного i -м узлом объекта теплового потока от внешних источников [5]: $(As_i(Es_i + Esp_i) + \varepsilon l_i Ep_i) S1_i$. В модели этот поток может достоверно имитироваться соответствующим увеличением внутреннего тепловыделения узла на величину Qa'_i . Кроме того, неявные, но существенные различия уравнений определяются отличием внешних тепловых факторов в космосе от их аналогов в имитационной наземной установке. Так, температура T'_s окружающих модель охлаждаемых экранов (наиболее распространенный хладагент в настоящее время — жидкий азот) заведомо выше радиационной температуры космического пространства T_s , а их степень черноты ε'_s заведомо ниже степени черноты космоса, равной единице.

Для точного воспроизведения динамики изменения температуры всех узлов объекта в узлах модели ($T'_i(\tau) = T_i(\tau)$) необходимо, чтобы уравнения теплового баланса для произвольного узла объекта и соответствующего ему узла модели были полностью эквивалентны. Это означает, что должны выполняться равенства:

$$\frac{Q_i}{Q'_i} = \frac{m_i \cdot Cp_i}{m'_i \cdot Cp'_i}, \quad (3)$$

$$\frac{(As_i(Es_i + Esp_i) + \varepsilon l_i Ep_i - \varphi_{si} \varepsilon 1_i \sigma (T_s'^4 - T_s^4)) S1_i}{Qa'_i} = \frac{m_i \cdot Cp_i}{m'_i \cdot Cp'_i}, \quad (4)$$

$$\frac{\varphi_{si} \cdot S1_i}{\varphi'_{si} \cdot S1'_i} \varepsilon 1_i (\varepsilon 1_i'^{-1} + \varepsilon_s'^{-1} - 1) = \frac{m_i \cdot Cp_i}{m'_i \cdot Cp'_i}, \quad (5)$$

$$\frac{R'_{ij}}{R_{ij}} = \frac{m_i \cdot Cp_i}{m'_i \cdot Cp'_i}, \quad (6)$$

$$\frac{\varphi 2_{ij} \cdot S2_i}{\varphi 2'_{ij} \cdot S2'_i} \cdot \frac{\varepsilon 2_i'^{-1} + \varepsilon 2_j'^{-1} - 1}{\varepsilon 2_i^{-1} + \varepsilon 2_j^{-1} - 1} = \frac{m_i \cdot Cp_i}{m'_i \cdot Cp'_i}. \quad (7)$$

Данные выражения могут быть использованы в качестве критериев подобия помещенной в вакуумную камеру тепловой модели полноразмерному объекту, находящемуся в реальных условиях космического пространства.

Масштабным фактором модели является кратность уменьшения теплоемкости ее тепловых узлов по отношению к соответствующим узлам объекта: $K = \frac{m_i \cdot Cp_i}{m'_i \cdot Cp'_i}$.

В соответствии со своим содержанием выражения (3)–(7) являются критериями подобия следующих параметров: (3) — тепловыделений, (4) — поглощенных тепловых потоков, (5) — площадей внешнего теплообмена, (6) — кондуктивных тепловых связей, (7) — площадей внутреннего теплообмена. Выражения (3), (4) и (5) являются критериями подобия тепловых узлов модели и объекта, а (6) и (7) — тепловых связей между узлами.

Оптимизация параметров масштабной тепловой модели

Критерий (6) показывает, что масштабный фактор K должен быть постоянным для всех кондуктивных тепловых связей узлов модели, а значит и для всех остальных их параметров. В противном случае невозможно достичь соответствия отношений R'_{ij}/R_{ij} при всех сочетаниях i и j .

Наиболее просто и однозначно на основании масштабного фактора K определяются тепловыделение тепловых узлов модели и параметры тепловых связей между ними. Так из критерия (3) следует, что тепловыделение тепловых узлов модели должно быть в K раз меньше по сравнению с тепловыделением соответствующих узлов объекта: $Q'_i = Q_i/K$; из критерия (6) — что кондуктивное тепловое сопротивление между узлами модели должно возрасти в K раз: $R'_{ij} = R_{ij} \cdot K$; из критерия (7) — что площади поверхностей внутреннего теплообмена узлов модели должны быть в K раз меньше соответствующих площадей узлов объекта: $S2'_i = S2_i/K$ при условии сохранения в модели взаимных угловых коэффициентов между тепловыми узлами $\varphi2'_{ij} = \varphi2_{ij}$ и степени черноты поверхностей внутреннего теплообмена $\varepsilon2'_i = \varepsilon2_i$.

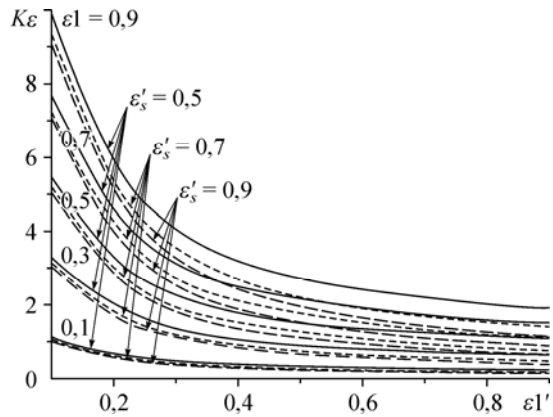
Менее очевиден выбор площади внешнего теплообмена $S1'_i$ и уровня поглощенного теплового потока Qa'_i для узла модели. Причиной этого является зависимость данных параметров от свободно изменяемых характеристик $\varepsilon1'_i$, ε'_s и T'_s и взаимосвязь их друг с другом.

Для наглядности дальнейших рассуждений можно принять, что угловые коэффициенты поверхностей внешнего теплообмена по отношению к космическому пространству (φ'_{si} , φ_{si}) равны единице. В большинстве случаев это соответствует действительности, в остальных — сделанные выводы будут относиться не к площади внешнего теплообмена ($S1'_i$, $S1_i$), а к произведению этой площади и углового коэффициента обзора внешнего пространства ($\varphi'_{si} \cdot S1'_i$, $\varphi_{si} \cdot S1_i$).

Критерий (5) показывает, что соотношение площадей внешнего теплообмена модели и объекта определяет не только масштабный фактор K , но и коэффициент $K_\varepsilon = \varepsilon1_i(\varepsilon1_i'^{-1} + \varepsilon_s'^{-1} - 1)$, учитывающий несоответствие степени черноты окружающих модель охлаждаемых экранов и космического пространства ($\varepsilon'_s \neq 1$), а также возможное несоответствие степени черноты поверхности внешнего теплообмена модели и объекта ($\varepsilon1'_i \neq \varepsilon1_i$). Таким образом, выражение для определения площади внешнего теплообмена модели будет иметь вид: $S1'_i = \frac{K_\varepsilon}{K} S1_i$.

Представленные на рис. 4 зависимости K_ε от $\varepsilon1'_i$ при различных значениях ε'_s и $\varepsilon1_i$ показывает, что выбор $\varepsilon1_i$ может использоваться как инструмент увеличения или уменьшения площади внешнего теплообмена узла модели. Степень черноты ε'_s не может

Рис. 4. Зависимость K_ε от ε_1' при изменении ε_1 в диапазоне от 0,1 до 0,9 и $\varepsilon_1's$ — от 0,5 до 0,9.



применяться в качестве такого инструмента по причине следующего наложенного на нее ограничения. Величина $\varepsilon_1's$ должна быть максимально приближена к единице, поскольку в противном случае возникает погрешность моделирования из-за переотражения излучения от одних тепловых узлов на другие через окружающие модель экраны.

Последним параметром узла модели, который необходимо воссоздать для воспроизведения температурного режима, является тепловыделение Qa'_i , имитирующее поглощенный узлом объекта тепловой поток: $(As_i(Es_i + Esp_i) + \varepsilon_1 Ep_i + \varepsilon_1 \sigma T_s^4)S1_i$. Критерий (4) показывает, что на тепловыделение Qa'_i оказывает существенное влияние температура окружающих модель экранов $T's$. На рис. 5 приведены зависимости плотности тепловыделения Qa'_i на единицу площади $S1_i$ от температуры $T's$ при различных значениях степени черноты ε_1 поверхности внешнего теплообмена объекта для двух уровней плотности поглощенного объектом лучистого потока — 0 и 100 Вт/м².

Данные зависимости имеют одинаковый вид для различных уровней поглощенного потока. Текущий уровень определяет смещение полученной зависимости по оси $Qa'_i/S1_i$. Анализ этих зависимостей показывает, что основной их особенностью является то, что при превышении температуры окружающих экранов ($T's$) определенного уровня тепловыделение Qa'_i становится отрицательным, то есть превращается в теплопоглощение.

Технические аспекты создания узловой масштабной тепловой модели

Техническая реализация полученных критериев в реальной конструкции теплового узла может быть проиллюстрирована на примере параметров одного из узлов уменьшенной модели телескопа ART-XC.

На рис. 6 показан тепловой узел — рентгеновская зеркальная система телескопа, разделенная в математической тепловой модели на два тепловых узла, и соответствующий ей элемент масштабной модели, полученной при масштабном факторе $K = 100$. В таблице приведены параметры одного из этих узлов и описаны технические средства получения требуемых параметров узла модели.

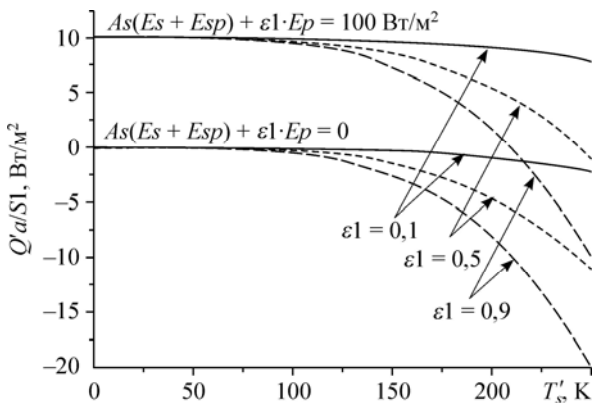


Рис. 5. Зависимости отношения $Qa'_i/S1_i$ от $T's$ при изменении ε_1 в диапазоне от 0,1 до 0,9 для двух уровней плотности поглощенного объектом лучистого потока 0 и 100 Вт/м².

РЗС (тепловые узлы № 1 и № 2)

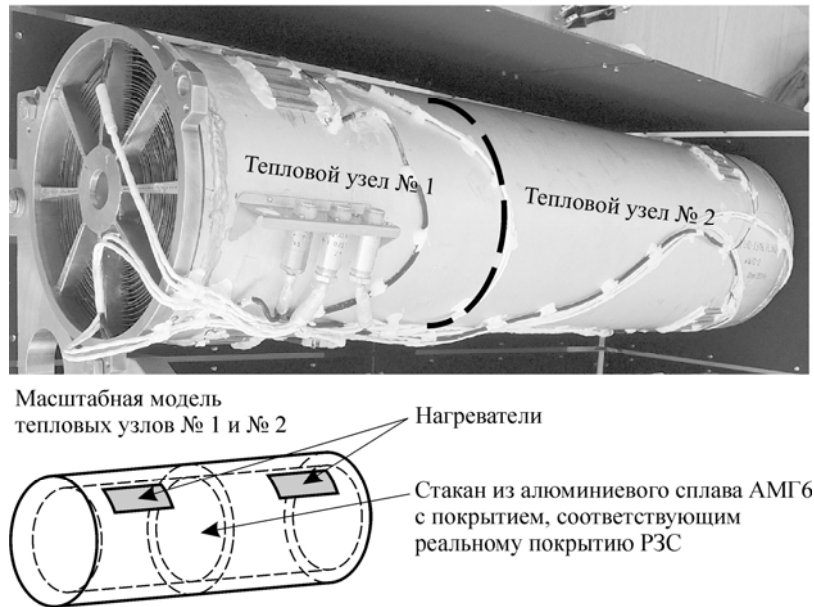


Рис. 6. Реальная рентгеновская оптическая система, состоящая из двух тепловых узлов, и схема ее масштабной тепловой модели.

Достоверность моделирования определяется тем, что способы реализации критериев подобия основаны либо на экспериментально определяемых характеристиках, либо на элементарных расчетах [6], не содержащих допущений, которые могли бы привести к ошибочным результатам.

Существуют некоторые приемы и ограничения, позволяющие оптимизировать параметры масштабной модели. Если модель будет полностью подобна объекту по форме и взаимному размещению тепловых узлов, то автоматически будет соблюдена эквивалентность взаимных угловых коэффициентов узлов объекта и модели ($\varphi_{ij} = \varphi'_{ij}$), в противном случае потребуется пересчет угловых коэффициентов.

Особым случаем является отработка с помощью уменьшенной модели системы управления нагревателями, поддерживающими температурный режим объекта в космосе. В этом случае нагреватели в модели должны иметь уменьшенную в K раз мощность, а система управления должна воспринимать их как нагреватели номинальной мощности. Для одновременного удовлетворения обоих этих требований последовательно с нагревателями модели должны быть установлены балластные электрические сопротивления, уменьшающие мощность нагревателей в требуемое число раз при сохранении номинальных параметров электропитания.

При воспроизведении в узле модели теплового потока Qa_i существуют два основных способа, равноценных с точки зрения соблюдения критерия подобия (4), но различных с точки зрения технической реализации. При температуре окружающих модель экранов ниже 50 К значение Qa_i является неотрицательным и может воспроизводиться с помощью нагревателей. При более высокой температуре экранов значение Qa_i становится меньше нуля и должно воспроизводиться с помощью охладителей Пельтье. В последнем случае сложность масштабной модели возрастает из-за необходимости наличия системы удаления тепла с тепловыделяющей поверхности элементов Пельтье, что

Таблица

Параметры теплового узла № 1 (верхняя часть рентгеновской зеркальной системы), его масштабной тепловой модели и способы реализации критериев подобия

Параметр теплового узла	Значение параметра теплового узла		Использованный критерий подобия и технический способ реализации
	в объекте	в модели	
Общая теплоемкость	$Cp_1 m_1 = 2904 \text{ Дж/к}$ ($m_1 = 6,6 \text{ кг}$)	$Cp'_1 m'_1 = 29,04 \text{ Дж/к}$ ($m'_1 = 0,315 \text{ кг}$)	Масштабный фактор $K = 100$ реализуется путем использования для изготовления узла модели того количества материала, которое имеет требуемую теплоемкость.
Внутреннее тепловыделение	$Q_1 = 10 \text{ Вт}$	$Q'_1 = 0,1 \text{ Вт}$	Критерий подобия (3) реализуется путем подбора электрических параметров нагревателя, имитирующего тепловыделение в узле.
Поглощенный внешний лучистый поток	$(As_1(Es_1 + Esp_1) + \varepsilon_{l_1} Ep_1 - \varepsilon_{l_1} \varphi_{si} \sigma (T_s^4 - T_s'^4)) S_{l_1} = 0$	$Qa'_1 \approx 0 \text{ Вт}$ (при охлаждении окружающих экранов жидким азотом $T'_s \sim 80 \text{ К}$)	Критерий подобия (4) реализуется путем подбора электрических параметров нагревателя, имитирующего поглощенный лучистый поток от внешних тепловых факторов.
Площадь поверхности и внешнего теплообмена	$S_{l_1} = 0,0219 \text{ м}^2$ (диск диаметром 167 мм)	$S'_{l_1} = 0,000219 \text{ м}^2$ (диск диаметром 16,7 мм)	Критерий подобия (5) реализуется путем подбора размера, формы и оптических характеристик покрытия поверхности внешнего теплообмена узла модели.
Тепловые сопротивления кондуктивных связей с другими тепловыми узлами	$R_{1,2} = 1,8 \text{ К/Вт}$ $R_{1,15} = 2,9 \text{ К/Вт}$ $R_{1,19} = 3,1 \text{ К/Вт}$	$R'_{1,2} = 180 \text{ К/Вт}$ $R'_{1,15} = 290 \text{ К/Вт}$ $R'_{1,19} = 310 \text{ К/Вт}$	Критерий подобия (6) реализуется за счет теплопроводности и геометрии (площади поперечного сечения S и длины l_{ij}) конструкции, соединяющей тепловые узлы исходя из зависимости: $l_{ij} = R'_{ij} \cdot \lambda \cdot S$.
Площадь поверхности внутреннего теплообмена	$S_{2,1} = 0,3121 \text{ м}^2$ (цилиндр диаметром 157 мм, длиной 593,5 мм)	$S'_{2,1} = 0,00312 \text{ м}^2$ (цилиндр диаметром 15,7 мм, длиной 59,35 мм)	Критерий подобия (3) реализуется путем подбора размера, формы и оптических характеристик покрытия поверхности внутреннего теплообмена узла модели.

в модели небольшого размера затруднительно. Кроме того, значительно возрастает сложность системы управления, поскольку для создания тарированного уровня теплопоглощения в элементе Пельтье нужно учитывать значительно большее количество характеристик [7], чем при генерировании тарированного теплового потока с помощью нагревателя. Таким образом, при имитации внешних тепловых условий для масштабной модели существует выбор: использовать вакуумную камеру с криогенными низкотемпературными экранами и упрощенную масштабную модель, оснащенную только нагревателями, или применить более сложную модель с охладителями Пельтье в сочетании с вакуумной камерой без криогенного охлаждения экранов. В этом случае дополнительным ограничением является то, что элементы Пельтье пригодны только для объектов, рабочий диапазон которых не превышает температурный диапазон функционирования элементов Пельтье.

Список литературы

1. Моделирование тепловых режимов космического аппарата и окружающей его среды / Козлов Л.В., Нусинов М.Д., Акишин А.И. и др.; под ред. акад. Г.И. Петрова. М.: Машиностроение, 1971. 380 с.
2. Pavlinsky M., Akimov V., Levin V., Lapshov I., Tkachenko A., Semena N., Arefiev V., Glushenko A., Yaskovich A., Burenin R., Sazonov S., Revnivtsev M., Buntov M., Grebenev S., Lutovinov A., Kudelin M., Grigorovich S., Litvin D., Lazarchuk V., Roiz I., Garin M., Gubarev M., Ramsey B., Kilaru K., O'Dell S.L., Elsner R. The ART-XC Instrument on board the SRG Mission: Proc. of the SPIE. 2011. Vol. 8147. P. 814706–814706-6.

3. Raybov A., Spirin V., Gulakov S., Garanin S., Grigorovich S., Pavlinskiy M., Semena N. Thermal conditions and deformations of the astronomical roentgen telescope // Global STAR Conf., Ses. 7, Amsterdam, 2012. 10 p.
4. Семена Н.П., Коновалов А.А. Методы создания механизмов саморегулирования пассивных систем обеспечения теплового режима устройств космического применения // Теплофизика и аэромеханика, 2007. Т. 14, № 1. С. 87–98.
5. Семена Н.П. Определение ориентации космического аппарата на основе анализа поля температур его внешней поверхности // Теплофизика и аэромеханика. 2009. Т. 16, № 1. С. 135–147.
6. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров. М.: Атомиздат, 1979. 216 с.
7. Кораблев В.А., Тахистов Ф.Ю., Шарков А.В. Прикладная физика. Термоэлектрические модули и устройства на их основе: уч. пособие // Под ред. проф. А.В. Шаркова. СПб: СПбГИТМО(ТУ), 2003. 44 с.

Статья поступила в редакцию 9 января 2013 г.